

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARIA ALINE LISNIEWSKI

CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS TRANSPORTADOS EM SUSPENSÃO E
TAXAS DE TRANSPORTE LONGITUDINAL NO LITORAL DO PARANÁ, BRASIL.

CURITIBA
2009

MARIA ALINE LISNIEWSKI

CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS TRANSPORTADOS EM SUSPENSÃO E
TAXAS DE TRANSPORTE LONGITUDINAL NO LITORAL DO PARANÁ, BRASIL.

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Geologia, Área de Concentração em Geologia Ambiental, Departamento de Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Rodolfo José Angulo.
Co-orientador: Prof. Dr. Eduardo Marone.

CURITIBA
2009

-
- L771c Lisniowski, Maria Aline, 1984
Concentração de sedimentos transportados em suspensão e
taxas de transporte longitudinal no litoral do Paraná,
Brasil[manuscrito] / Maria Aline Lisniowski. – 2009.
[13] 111 f. : il. [algumas color.] ; 31 cm.
Impresso.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor
de Ciências da Terra, curso de Pós-graduação em Geologia
Ambiental, 2009.
“Orientador: Prof. Dr. Rodolfo José Ângulo e co-orientador:
Prof. Dr. Eduardo Marone”.
Bibliografia: f. 90-99
1. Sedimentação e depósitos - Paraná. 2. Sedimentos
(Geologia). 3. Transporte de sedimento. I. Universidade
Federal do Paraná. II. Ângulo, Rodolfo José. III. Marone,
Eduardo. IV. Título.

CDD: 551.354

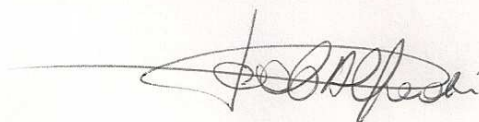
Bibliotecário: **Arthur Leitis Junior – CRB9/1548**

TERMO DE APROVAÇÃO

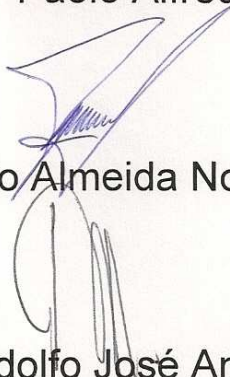
Maria Aline Lisniowski

CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS TRANSPORTADOS EM SUSPENSÃO E TAXA DE TRANSPORTE LONGITUDINAL NO LITORAL DO PARANÁ, BRASIL.


Dissertação de Mestrado aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Geologia, área de concentração em Geologia Ambiental, da Universidade Federal do Paraná. A comissão julgadora foi formada por:



Prof. Dr. Paolo Alfredini - USP



Prof. Dr. Mauricio Almeida Noernberg - UFPR



Prof. Dr. Rodolfo José Angulo - UFPR
Presidente

Curitiba, 26 de junho de 2009.

Dedico este trabalho à minha família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente e com especial carinho às pessoas que me acompanham irrestritamente a cada passo dado, demonstrando sempre seu apoio e amor, minha família.

Ao meu orientador Rodolfo José Angulo, por sua admirável competência e disponibilidade em ajudar e por ser um profissional brilhante e sempre entusiasmado com o trabalho.

Aos que contribuíram enormemente na obtenção dos dados de campo: Clécio José Lopes de Quadros, Rangel Angelotti, Thaís Guimarães de Freitas e Daniela Zaramella. Também agradeço ao meu co-orientador Eduardo Marone, por todo o apoio técnico.

Ao Dr. Jon Williams por sua grande ajuda na elaboração final dos resultados, e por sua seriedade e atenção em todos os momentos.

Agradeço também à Luciana Slomp Esteves, por ter acreditado em meu futuro como pesquisadora e sempre me influenciado de tantas formas positivas ao longo desses anos, contribuindo grandemente nas minhas realizações profissionais.

A todos os funcionários e professores do Departamento de Geologia que contribuíram de alguma forma, especialmente à Dra. Maria Cristina de Souza, à secretária da Pós-Graduação Sarita Pavin e ao laboratorista Daniel Paredes.

Aos camaradas, que de boa vontade ajudaram na construção das armadilhas de sedimentos.

Aos meus amigos e companheiros do programa de Pós-Graduação: Ednilson Roberto do Nascimento, Denise Alessandra Monteiro Machado, José Carlos Branco, Fábio Manassés, Luiz Carlos Godoy, Cristiane Rubini Dutra, Lincoln Oliveira Lopes, Mark Augusto Lara Pereira, Roderlei Cleber Mocellin, Marcelo Eduardo José Müller e Vinícios Hyczy do Nascimento.

A bolsa de estudos concedida pela Capes.

E agradeço a todos os meus outros amigos, que me apoiaram, foram compreensivos e os responsáveis por grandes alegrias durante esses dois anos de trabalho.

RESUMO

A linha de costa do litoral do Paraná, situada na planície costeira de Praia de Leste, possui 35 km de extensão e é limitada pelas desembocaduras das baías de Guaratuba e Paranaguá, no sul e no norte, respectivamente. A linha de costa é alinhada no sentido NE-SW. Ali as ondas se aproximam principalmente de SE, provocando uma corrente longitudinal que é preferencialmente em direção ao norte (Pontal do Sul). A amplitude média das marés é de 1,5 m e problemas com erosão e elevação do nível do mar durante marés meteorológicas na parte mais urbanizada sul (Matinhos) levaram a construção de alguns sistemas de proteção costeira. Neste trabalho, armadilhas de sedimento (streamer traps) foram usadas para coletar perfis verticais de concentração de sedimento em suspensão, transportados pelas correntes longitudinais, em três pontos ao longo da planície costeira de Praia de Leste (do sul para o norte): Praia Brava de Matinhos, Caravelas (ambos no município de Matinhos), e Atami (Pontal do Sul). Os dados obtidos têm mostrado que o estado das praias muda de um perfil com declive mais acentuado na parte sul para um perfil mais longo e convexo no norte. A Praia Brava apresentou as menores concentrações de material transportado (até 0,326 g/L). O ponto Caravelas foi o que apresentou as maiores concentrações (até 1,042 g/L), seguido do ponto Atami, que apresentou valores de até 0,796 g/L. O modelo utilizado para estimar as taxas de concentração na área de estudo se mostrou ineficiente para representar as concentrações de sedimentos quando comparados com os dados de campo coletados através das armadilhas. Grande parte dos erros deriva da dificuldade em se obter a rugosidade do fundo relativa às formas de leito presentes, seja por medições ou através de aproximações. Foram observados quatro grupos de perfis verticais de concentração, que apresentam variação na sua forma em função da dominância ora dos processos relacionados à quebra da onda, ora das correntes longitudinais geradas pelas ondas, ora da interação mais uniforme dos dois processos. A concentração de sedimentos em suspensão apresentou-se variável no tempo e no espaço. Diferenças significativas no tamanho médio de grão foram encontradas para as amostras das praias estudadas. Metade dos resultados aponta para uma diminuição do tamanho de grão com a diminuição da profundidade. O modelo de Bayram *et al.* (2007) foi usado para estimar taxas de transporte e se mostrou sensível às variações nos tamanhos de grão escolhidos para representar as amostras do sedimento em suspensão, principalmente com maiores alturas de onda. Valores maiores no tamanho médio do sedimento indicaram taxas subestimadas do transporte em até 54% para a praia do Atami quando comparadas aos valores encontrados nas amostras em suspensão. Em contrapartida, valores menores de resultaram em taxas superestimadas em 20% para o balneário Caravelas e 44% para a Praia Brava.

Palavras-chave: armadilhas, sedimento, concentração, taxas, transporte longitudinal, Paraná.

ABSTRACT

The shoreline of Praia de Leste coastal plain (state of Paraná, Brazil) is 35 km long and limited by the entrances of the Paranaguá and Guaratuba Bay in the north and south, respectively. The shoreline is aligned NE-SW, waves approach mainly from SE and longshore current is dominantly from south to north. Amplitude of spring tides is 1.5 m. Erosion problems affect urbanisation in the south (Matinhos) while accretion processes dominate in the north (Pontal do Sul). Beach erosion and coastal flooding have destroyed beachfront houses and roads in the area of Matinhos, triggering a series of coastal defence schemes. In this study, streamer traps were used to collect field measurements of suspended sediment transported alongshore in three locations along the coast of Praia de Leste coastal plain (from south to north): Praia Brava, Caravelas (both in the area of Matinhos), and Atami (Pontal do Sul). Data show that beach morphology changes from a well-defined scarp and steeper profile in the south to a longer and more convex-shape profile in the north. The Praia Brava beach revealed the lowest suspended concentrations (up to 0.326 g/L). The highest concentrations were found to Caravelas (up to 1.042 g/L), followed by the Atami beach, which presented values up to 0.796 g/L. The model used to estimate the concentrations in suspension at the study area appears to be inefficient to represent the actual concentrations, when compared with field data, collected using streamer traps. Most of the errors are derived from the difficulty in obtaining the bed roughness related to the bedforms present in the field. Four groups of the vertical suspended sediment profiles were identified and they vary in form depending upon the dominance of different coastal processes, such as the influence of waves, currents and the interaction between waves and currents. Significant variation was observed in the medium grain sizes present in the suspended samples at the study sites. Half of the results indicate a decreasing in grain sizes with distance from the bed. The model developed by Bayram *et al.* (2007) was used to estimate the total longshore transport rates and revealed to be very sensitive to the chosen specific grain size inputted in the equation to represent the suspended sediment. The greatest variation was identified to the highest wave height values. The use of bigger grain sizes (from the bed samples) underestimated the transport rates in 54 % in the Atami beach, when compared to rates estimated using the actual grain size values of suspended samples. On the other hand, the use of smaller grains sizes from the bed sediment generated overestimated values to the Caravelas beach (up to 20%) and to the Praia Brava beach (up to 44%).

Key words: traps, sediment, concentration, rates, longshore transport, Paraná

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Perfil praial contendo a terminologia utilizada neste trabalho (modificado de Angulo, 1992).....	11
Figura 2: Visão geral da área de estudo, no litoral sul do Paraná.....	19
Figura 3: Imagem de satélite mostrando evidências do transporte longitudinal de sedimentos no fim do verão - 27 de março de 2003 (Fonte: Google Earth, acessado em julho de 2008).	25
Figura 4: Localização do balneário Atami, próximo à desembocadura da baía de Paranaguá (Foto: Paulo Mayer - 2007).	26
Figura 5: Diferenças entre os perfis de praia para o balneário Caravelas (a) e para o balneário Atami (b). Adaptado de Quadros (2002).	28
Figura 6: À esquerda os efeitos da erosão na praia Brava até o ano de 1983, depois da rápida ocupação desta área, e os espigões colocados na praia – indicados pelas flechas (Fonte: http://www.netpar.com.br/lindroth). À direita o estado da praia no ano de 2007.	29
Figura 7: Estrutura utilizada na coleta de sedimentos, com suas dimensões e a numeração utilizada em cada uma das 6 redes.	32
Figura 8: Detalhe da armação utilizada, com o tamanho de malha, as dimensões de cada armação e a distância entre cada uma.	33
Figura 9: Derivadores usados para medir as correntes longitudinais.....	35
Figura 10: Perfil praial obtido durante a coleta do dia 26/07/2007 para o ponto Atami, mostrando a localização de cada armadilha (A1 e A2) e suas respectivas profundidades, relativas ao nível do mar no momento das medições.....	44
Figura 11: Perfis verticais de concentração de sedimentos, MPS (g/L ou Kg/m ³) transportado pela corrente longitudinal de acordo com a altura na coluna d'água (z) para um período de 10 minutos no perfil Atami (26/07/2007).	45
Figura 12: Distribuição do diâmetro médio das partículas (D ₅₀) de acordo com a altura da coluna de água (z), para os pontos A1 e A2.	45
Figura 13: Perfil praial obtido durante a coleta do dia 26/07/2007 para o ponto Caravelas, mostrando a localização de cada armadilha (C1 e C2) e suas respectivas profundidades, relativas ao nível do mar no momento das medições.....	46

Figura 14: Perfis verticais de concentração de sedimentos, MPS (g/L ou Kg/m ³) transportado pela corrente longitudinal de acordo com a altura na coluna d'água para um período de 6 minutos no perfil Caravelas (26/07/2007).....	47
Figura 15: Distribuição do diâmetro médio das partículas (D ₅₀) de acordo com a altura da coluna de água (z), para os pontos C1 e C2.....	47
Figura 16: Perfil praial obtido durante a coleta do dia 26/07/2007 para o ponto Praia Brava, mostrando a localização de cada armadilha (PB1 e PB2) e suas respectivas profundidades, relativas ao nível do mar no momento das medições.....	48
Figura 17: Perfis verticais de concentração de sedimentos, MPS (g/L ou Kg/m ³) transportado pela corrente longitudinal de acordo com a altura na coluna d'água para um período de 5 minutos no perfil Praia Brava (26/07/2007).....	49
Figura 18: Distribuição do diâmetro médio das partículas (D ₅₀) de acordo com a altura da coluna de água (z), para os pontos PB1 e PB2.....	49
Figura 19: Perfil praial obtido durante a coleta do dia 26/08/2007 para o ponto Atami, mostrando a localização de cada armadilha (A3 e A4) e suas respectivas profundidades, relativas ao nível do mar no momento das medições.....	51
Figura 20: Perfis verticais de concentração de sedimentos, MPS (g/L ou Kg/m ³) transportado pela corrente longitudinal de acordo com a altura na coluna d'água para um período de 10 minutos no perfil Atami (26/08/2007).....	51
Figura 21: Distribuição do diâmetro médio das partículas (D ₅₀) de acordo com a altura da coluna de água (z), para os pontos A3 e A4.	52
Figura 22: Perfil praial obtido durante a coleta do dia 26/08/2007 para o ponto Caravelas, mostrando a localização de cada armadilha (C3 e C4) e suas respectivas profundidades, relativas ao nível do mar no momento das medições.....	53
Figura 23: Perfis verticais de concentração de sedimentos, MPS (g/L ou Kg/m ³) transportado pela corrente longitudinal de acordo com a altura na coluna d'água para um período de 5 minutos no perfil Caravelas (26/08/2007).....	53
Figura 24: Distribuição do diâmetro médio das partículas (D ₅₀) de acordo com a altura da coluna de água (z), para os pontos C3 e C4.....	54
Figura 25: Perfil praial obtido durante a coleta do dia 26/08/2007 para o ponto Praia Brava, mostrando a localização de cada armadilha (PB3 e PB4) e suas respectivas profundidades, relativas ao nível do mar no momento das medições.....	55
Figura 26: Perfis verticais de concentração de sedimentos, MPS (g/L ou Kg/m ³) transportado pela corrente longitudinal de acordo com a altura na coluna d'água para um período de 5 minutos no perfil Praia Brava (26/08/2007).....	55

Figura 27: Distribuição do diâmetro médio das partículas (D_{50}) de acordo com a altura da coluna de água (z), para os pontos PB3 e PB4.....	56
Figura 28: Perfil praial obtido durante a coleta do dia 27/02/2008 para o ponto Atami, mostrando a localização de cada armadilha (A5 e A6) e suas respectivas profundidades, relativas ao nível do mar no momento das medições.....	57
Figura 29: Perfis verticais de concentração de sedimentos, MPS (g/L ou Kg/m ³) transportado pela corrente longitudinal de acordo com a altura na coluna d'água para um período de 10 minutos no perfil Atami (27/02/2008).....	58
Figura 30: Distribuição do diâmetro médio das partículas (D_{50}) de acordo com a altura da coluna de água (z), para os pontos A5 e A6.	59
Figura 31: Perfil praial obtido durante a coleta do dia 27/02/2008 para o ponto Caravelas, mostrando a localização de cada armadilha (C5 e C6) e suas respectivas profundidades, relativas ao nível do mar no momento das medições.....	59
Figura 32: Perfis verticais de concentração de sedimentos, MPS (g/L ou Kg/m ³) transportado pela corrente longitudinal de acordo com a altura na coluna d'água para um período de 10 minutos no perfil Caravelas (27/02/2008).....	60
Figura 33: Distribuição do diâmetro médio das partículas (D_{50}) de acordo com a altura da coluna de água (z), para os pontos C5 e C6.	61
Figura 34: Perfil praial obtido durante a coleta do dia 27/02/2008 para o ponto Praia Brava, mostrando a localização de cada armadilha (PB5 e PB6) e suas respectivas profundidades, relativas ao nível do mar no momento das medições.....	61
Figura 35: Perfis verticais de concentração de sedimentos, MPS (g/L ou Kg/m ³) transportado pela corrente longitudinal de acordo com a altura na coluna d'água para um período de 10 minutos no perfil Praia Brava (27/02/2008).	62
Figura 36: Distribuição do diâmetro médio das partículas (D_{50}) de acordo com a altura da coluna de água (z), para os pontos PB5 e PB6.....	63
Figura 37: Perfil praial obtido durante a coleta do dia 19/03/2008 para o ponto Atami, mostrando a localização de cada armadilha (A7 e A8) e suas respectivas profundidades, relativas ao nível do mar no momento das medições.....	64
Figura 38: Perfis verticais de concentração de sedimentos, MPS (g/L ou Kg/m ³) transportado pela corrente longitudinal de acordo com a altura na coluna d'água para um período de 10 minutos no perfil Atami (19/03/2008).....	65
Figura 39: Distribuição do diâmetro médio das partículas (D_{50}) de acordo com a altura da coluna de água (z), para os pontos A7 e A8.	65

Figura 40: Perfil praial obtido durante a coleta do dia 19/03/2008 para o ponto Atami, mostrando a localização de cada armadilha (C7 e C8) e suas respectivas profundidades, relativas ao nível do mar no momento das medições.....	66
Figura 41: Perfis verticais de concentração de sedimentos, MPS (g/L ou Kg/m ³) transportado pela corrente longitudinal de acordo com a altura na coluna d'água para um período de 10 minutos no perfil Caravelas (19/03/2008).....	67
Figura 42: Distribuição do diâmetro médio das partículas (D ₅₀) de acordo com a altura da coluna de água (z), para os pontos C7 e C8.	67
Figura 43: Perfil praial obtido durante a coleta do dia 19/03/2008 para o ponto Praia Brava, mostrando a localização de cada armadilha (PB7 e PB8) e suas respectivas profundidades, relativas ao nível do mar no momento das medições.....	68
Figura 44: Perfis verticais de concentração de sedimentos, MPS (g/L ou Kg/m ³) transportado pela corrente longitudinal de acordo com a altura na coluna d'água para um período de 10 minutos no perfil Praia Brava (19/03/2008).	69
Figura 45: Distribuição do diâmetro médio das partículas (D ₅₀) de acordo com a altura da coluna de água (z), para os pontos PB7 e PB8.....	69
Figura 46: Taxas de transporte longitudinal estimadas para a praia do Atami através da equação de Bayram et al, (2007).	72
Figura 47: Taxas de transporte longitudinal estimadas para a praia de Caravelas através da equação de Bayram et al, (2007).....	72
Figura 48: Taxas de transporte longitudinal estimadas para a Praia Brava de Matinhos através da equação de Bayram et al, (2007)	73
Figura 49: Diferentes formas dos perfis de concentração de sedimentos, calculados para todos as 24 coletas e representadas por I, II, III e IV.	83
Figura 50: Distribuição do tamanho de grão D ₅₀ (mm) em suspensão de acordo com a altura da coluna de água z (m), para os pontos que apresentaram tendência de diminuição do tamanho de D ₅₀ com o decréscimo da profundidade.	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Condições hidrodinâmicas predominantes durante a coleta do dia 26/07/2007.....	43
Tabela 2: Condições hidrodinâmicas predominantes durante a coleta do dia 26/08/2007.....	50
Tabela 3: Condições hidrodinâmicas predominantes durante a coleta do dia 27/02/2008.....	57
Tabela 4: Condições hidrodinâmicas predominantes durante a coleta do dia 19/03/2008.....	63
Tabela 5: Dados de alturas de ondas (H_b), ângulo de aproximação (α), D_{50} do sedimento em suspensão (D_{50s}), D_{50} do sedimento do fundo (D_{50F}) e velocidade da corrente longitudinal (U_L) para os pontos Atami, Caravelas e Praia Brava.	71
Tabela 6: Características dos três locais estudados, detalhando: descrição geral da praia, diâmetro médio do sedimento em suspensão, diâmetro médio do sedimento do fundo, altura de onda e períodos de onda medidos.	74
Tabela 7: Condições hidrodinâmicas predominantes durante todas as coletas.....	75

LISTA DE SÍMBOLOS

- $\bar{C}(a)$ - valor de referência \bar{C} a uma profundidade a
 $\hat{\tau}_{ws}(x)$ - estimativas da tensão de cisalhamento induzida por ondas
 η - altura das formas de leito (ripples)
 α - ângulo de aproximação das ondas em relação à costa
 λ - comprimento das formas de leito (ripples)
 ρ - densidade do fluido
 ε - difusidade do sedimento
 Θ - parâmetro escalar entre os intervalos de 0,3 a 3,0
 ν - viscosidade cinemática da água ($1,36 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)
 θ_{crit} - parâmetro de Shields
 ρ_s - para grãos de quartzo = 2650 kg/m^3
 α_{wc} - parâmetro Rouse para ondas
 τ_0 - tensão de cisalhamento (área)
 A_o - a amplitude orbital das ondas
 C - concentração dos sedimentos transportados em suspensão
 C_d - coeficiente de arrasto
 D^* - parâmetro de tamanho de grão adimensional
 D^*_s - valores D^* para aquele sedimento
 D_{50} - diâmetro médio da partícula
 D_{50s} - diâmetro do grão medido das amostras coletadas pelas redes
 F - fluxo de energia de onda em direção à costa
 f_w - fator de fricção da onda
 g - aceleração da gravidade $9,81 \text{ m}^2/\text{s}$
 H_b - altura de onda
 κ - parâmetro de Von Kármán (0,4)
 k_s - rugosidade do fundo
 L - escala vertical de parametrização para o fluxo oscilatório para fundos com formas de leito
 ϕ - phi
 Q_{LS} - taxa de transporte longitudinal
 r - rugosidade relativa
 s - razão da densidade do grão e do fluido (ρ_s/ρ)
 T - período da onda
 U^* - tensão de cisalhamento (velocidade de fricção no fundo)
 U_{crit} - velocidade crítica da tensão de cisalhamento
 U_L - velocidade média da corrente longitudinal na zona de surfe
 $U_L(z)$ - velocidade da corrente longitudinal a uma altura z acima do fundo
 U_w - velocidade orbital das ondas
 w_s - velocidade de queda das partículas
 z_{0G} - rugosidade causada pelos sedimentos que compõe o fundo
 z_{0Q} - rugosidade causada pelo transporte de partículas
 z_{0R} - rugosidade causada pelas formas de leito
 z_o - rugosidade total
 Ω - parâmetro adimensional para definir os estágios morfodinâmicos praias.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	3
1.2 JUSTIFICATIVA	4
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	6
2.1 TRABALHOS ANTERIORES	8
2.2 TEORIAS DO TRANSPORTE	10
2.3 TEORIAS DO TRANSPORTE LONGITUDINAL	15
2.4 DEFINIÇÃO E ASPECTOS HISTÓRICOS DOS MODELOS DE TRANSPORTE LONGITUDINAL	17
3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	19
3.1 GEOLOGIA	20
3.2 PARÂMETROS FÍSICOS DO LITORAL PARANAENSE	21
3.2.1 Clima	21
3.2.2 Marés	22
3.2.3 Ondas	23
3.2.4 Corrente longitudinal e transporte de sedimentos	24
3.3 PONTOS DE COLETA	25
3.3.1 Balneário Atami	26
3.3.2 Balneário Caravelas	27
3.3.3 Balneário Praia Brava	28
4 MATERIAIS E MÉTODOS	31
4.1 ARMADILHAS DE SEDIMENTO	31
4.2 SEDIMENTOS DO FUNDO	34
4.3 PERFIS DE PRAIA	34
4.4 DIREÇÃO E VELOCIDADE DA CORRENTE LONGITUDINAL	34
4.5 DIREÇÃO, ALTURA E PERÍODO DAS ONDAS	35
4.6 GRANULOMETRIA	35
4.7 PERFIS DE CONCENTRAÇÃO (C-PROFILES)	36
4.7.1 Sedimentos	37
4.7.2 Rugosidade do fundo	38
4.7.3 Ondas	39
4.7.4 Interações ondas + correntes e perfis de concentração	40
4.8 TAXA DE TRANSPORTE LONGITUDINAL Q_{LS}	41
5 RESULTADOS	42

5.1 PRIMEIRA COLETA – 26 DE JULHO DE 2007.....	43
5.1.1 Atami	43
5.1.2 Caravelas	46
5.1.3 Praia Brava.....	48
5.2 SEGUNDA COLETA – 26 DE AGOSTO DE 2007.....	50
5.2.1 Atami	50
5.2.2 Caravelas	52
5.2.3 Praia Brava.....	54
5.3 TERCEIRA COLETA – 27 DE FEVEREIRO DE 2008.....	56
5.3.1 Atami	57
5.3.2 Caravelas	59
5.3.3 Praia Brava.....	61
5.4 QUARTA COLETA – 19 DE MARÇO DE 2008	63
5.4.1 Atami	64
5.4.2 Caravelas	66
5.4.3 Praia Brava.....	68
5.5 Taxas de transporte longitudinal	70
6 DISCUSSÃO	74
6.1 DADOS HIDRODINÂMICOS	75
6.2 CONCENTRAÇÕES DE SEDIMENTOS	76
6.2.1 Atami	76
6.2.2 Caravelas	78
6.2.3 Praia Brava.....	79
6.2.4 Considerações gerais.....	80
6.2.5 Curvas de concentração geradas pelos modelos	81
6.2.6 Tipos de perfis	81
6.3 VARIAÇÃO NA GRANULOMETRIA	84
6.4 TAXAS DE TRANSPORTE.....	86
7 CONCLUSÕES	88
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90
9 APÊNDICES.....	100

1 INTRODUÇÃO

A região costeira é definida com base no limite onde oceano, continente e atmosfera interagem, também incluindo outros sistemas aquáticos sob influência das águas oceânicas. Essas zonas possuem uma grande mobilidade e são reconhecidas pela riqueza de seus ecossistemas, como manguezais, marismas, dunas e recifes de corais. Os sistemas costeiros correspondem à primeira defesa contra os efeitos de elevações do nível do mar, como marés meteorológicas, e também contra inundações, ondas de tempestade e tsunamis. Porém, também possuem grande importância em outras atividades econômicas e sociais, como pesca, turismo e serviços portuários. Muitas obras de engenharia têm sido realizadas na zona costeira do Brasil, mais intensamente a partir do meio do século XX, com objetivo principal de otimizar atividades econômicas importantes. Logo, o impacto dessas obras se tornou de especial interesse, não só dos engenheiros, mas também da população que reside ou usufrui desses locais, bem como dos governantes.

Existem inúmeras definições que estabelecem os limites da região costeira e uma das mais aceitas foi determinada por Turner & Von Bodungen (2001) onde a região costeira estaria entre os limites da linha de costa até 100 km adentrando o continente. Essa delimitação está baseada com relevância ao gerenciamento costeiro e não necessariamente considerando os processos atuantes nesse ambiente. Estimativas dos mesmos autores afirmam que aproximadamente 60% da população mundial vive nos limites compreendidos entre 100 km da linha de costa, mostrando que apesar deste território possuir uma extensão muito menor comparado às porções continentais, existe uma preferência de ocupação destas áreas, inclusive em porções muito próximas à linha d'água.

A linha de costa por sua vez, é definida como o limite entre o oceano e o continente, sendo caracterizada pela presença de feições morfológicas como falésias, manguezais ou qualquer outra feição que marque o início do continente. As variações na posição da linha de costa, que são atribuídas a processos naturais e antrópicos, ocorrem em várias escalas de tempo e espaço, e podem ser causadas por flutuações no nível do mar, tempestades, redução no suprimento de sedimentos

(como os provenientes de rios), obras costeiras ou outras interferências do homem nos sistemas naturais marinhos.

Os processos que ocorrem na zona de surfe e influenciam modificações na linha de costa são extremamente dinâmicos, envolvendo a ação de ondas, de correntes induzidas por ondas e de movimento de sedimentos. Um dos processos mais importantes na modificação da morfologia costeira é o transporte de sedimentos, longitudinal e transversal à linha de costa.

Embora conhecer a quantidade e a qualidade dos sedimentos transportados pelas correntes litorâneas seja de fundamental importância para o planejamento de obras costeiras e para o estudo das variações da linha de costa, ainda hoje existem poucos trabalhos publicados com base em dados de campo (Bayram *et al.*, 2001).

Desta forma, as construções que ocupam regiões muito dinâmicas e expostas à ação de ondas podem ser danificadas, tanto em eventos extremos (i.e. tempestades e marés meteorológicas) como numa escala de tempo mais longa, gerando processos erosivos localizados. Esses problemas levam à construção adicional de sistemas de proteção costeira, que nem sempre são feitos com as devidas precauções, considerando dados históricos ou mesmo medições e previsões feitas através de modelagens. Esses sistemas também são bastante caros e de difícil manutenção, mostrando uma certa insustentabilidade, considerando as atuais previsões de aumento do nível do mar.

As modelagens do campo de ondas devem ser realizadas usando dados reais de medições de ondas, dados de ventos por longos períodos e também usando a batimetria local. Todas essas informações são usadas em sistemas computacionais para gerar os padrões de ondas que vão atingir a costa em várias escalas de tempo, como meses, anos ou décadas. As modelagens de onda são muito importantes, porém não podem definir variações para a linha de costa, e para isso são utilizados os modelos de transporte de sedimentos, inferindo taxas anuais e o balanço médio (entrada ou saída) de sedimentos em diferentes porções da costa. Isso nos permite avaliar que regiões serão mais suscetíveis e ajuda a tomar decisões quanto ao tipo de proteção costeira mais apropriada.

Com o objetivo de quantificar o transporte de material particulado ao longo da costa central do Paraná, foram realizados quatro levantamentos de campo entre junho de 2007 e março de 2008, em 3 pontos distintos: praia Brava de Matinhos, Caravelas e Atami. Os dados utilizados foram obtidos através do uso de armadilhas

de sedimento (*streamer trap*) na zona de surfe (Kraus *et al.*, 1983; Kraus, 1987; Kraus & Dean, 1987).

Neste trabalho, as amostras possibilitaram avaliar as variações nas características granulométricas do sedimento transportado ao longo da costa em cada local, realizando análises para verificar se há ou não uma distribuição homogênea dos tamanhos de grão ao longo da zona de surfe (transversalmente à linha de costa) e ao longo da coluna de água (verticalmente). Sempre que possível foram feitas relações entre as condições de energia das ondas e correntes e a quantidade de sedimento transportada. Os dados possibilitaram também o cálculo de taxas de transporte longitudinal. Estas informações são de grande importância para planos de gerenciamento costeiro local.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal foi a caracterização do transporte longitudinal dos sedimentos não-coesivos ao longo da costa na região central do litoral do Paraná. Entre os objetivos específicos estão:

- Analisar as variações nos perfis de concentração de sedimentos transportados, considerando os dados medidos e também os resultados das previsões feitas através de um modelo 1D (Williams *et al.*, 1999a,b).
- Determinar as variações granulométricas a partir das amostras coletadas pelas armadilhas de sedimentos em diferentes distâncias do fundo.
- Quantificar o transporte pontual de areia na zona de surfe usando o modelo formulado por Bayram *et al.* (2007) incluindo as variações granulométricas do sedimento em suspensão e compará-lo com os resultados de previsões genéricas utilizando apenas o tamanho de grão D_{50} do sedimento do fundo.

- Definir locais com perda de sedimento por erosão ou ganho por acreção a partir dos resultados obtidos.

1.2 JUSTIFICATIVA

A quantificação do transporte litorâneo no Brasil consiste, em sua grande maioria, em aplicações de modelos matemáticos com base em dados de ondas que também são gerados através de modelos (e.g. Lima *et al.*, 2001; Bittencourt *et al.*, 2003; Williams & Esteves, 2004), portanto não consideram dados reais do transporte. A utilização dos dados de transporte sedimentar para modelar as flutuações da linha de costa contribui para a compreensão dos fatores que determinam e influenciam as variações espaciais e temporais da morfologia costeira (Williams & Esteves, 2005).

Para a costa central do Paraná os únicos dados obtidos referem-se à porção mais próxima à desembocadura da baía de Paranaguá (Martins *et al.*, 2004). Esta região é influenciada pelas correntes de maré predominantes, que, portanto, não estão relacionadas ao transporte longitudinal causado por ondas e correntes geradas por ondas.

A dificuldade de se obter dados quantitativos sobre o transporte de sedimentos na zona de surfe deve-se a uma série de fatores, tais como: a dificuldade e o risco de instalar equipamentos sensíveis em um ambiente de alta energia e sujeito ao embate das ondas; às limitações dos instrumentos acústicos em obter dados confiáveis devido à presença de grande quantidade de bolhas de ar na coluna de água e a ineficiência dos instrumentos óticos em reconhecer partículas tamanho areia (Wang *et al.*, 1998a; Bayram *et al.*, 2001). Desta forma, a aplicação de armadilhas de sedimento ainda é um método simples, relativamente eficiente e de baixo custo para obter a concentração de sedimentos na zona de surfe, apesar de ser limitado para amostragens em condições de alta energia (Kraus, 1987).

Espera-se que os resultados desta pesquisa tenham aplicação para as linhas de praia arenosas estudadas, gerando um interesse significativo na comunidade científica, especificamente as que se dedicam aos estudos de processos costeiros e engenharia costeira. Além de existirem poucos dados de campo que contribuam ao estudo do transporte de sedimentos, estes estão geralmente enfocados nas variações quantitativas do fluxo e obtenção de taxas reais de transporte, deixando uma lacuna sobre a distribuição desses sedimentos na coluna de água durante o processo. Dados sobre as variações na distribuição granulométrica dos sedimentos na zona de surfe são úteis para compreender melhor a influência das ondas e correntes na zona de surfe (i.e. dissipação de energia, os efeitos da turbulência e da tensão de cisalhamento com o fundo).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As praias e linhas costeiras podem apresentar a mesma disposição geográfica por longos períodos, onde variações apenas são notadas em relação às marés e ressacas. Porém, o equilíbrio na natureza é considerado dinâmico, pois os sedimentos não se encontram em repouso por todo o tempo. Pelo contrário, a morfologia de uma linha de costa é mantida pela entrada e saída constante do sistema, no mesmo período de tempo, de quantidades médias iguais de sedimentos. Esta é a noção correta do equilíbrio dinâmico de uma linha de costa.

Para que esse equilíbrio seja rompido é necessário que as forças envolvidas no processo, destruam o status anterior. Este rompimento geralmente ocorre devido a fenômenos naturais ou pela ação do homem, que através de obras de engenharia costeira obstrui ou altera a passagem dos sedimentos. A erosão e a acresção de sedimentos ao longo das linhas de praia são fenômenos provenientes deste desequilíbrio de forças. Portanto, é fundamental que qualquer obra de engenharia costeira seja conduzida através do conhecimento de como estes fatos ocorrem, para que possa fazer as escolhas corretas, evitando ou corrigindo os estragos causados por este estado de desequilíbrio.

A caracterização dos estados de equilíbrio morfodinâmico praias agrupam as características da onda e dos sedimentos. Wright & Short (1984) utilizaram o parâmetro adimensional $\Omega = H_b/w_s T$, onde H_b é a altura da onda de arrebentação, w_s é a velocidade de queda das partículas e T corresponde ao período da onda incidente. Desta forma estabeleceram que $\Omega < 1$ resulta em um estado morfodinâmico refletivo, indicando que a face praial terá alta declividade, com a presença comum de cúspides praias e sedimentos de textura relativamente grossa. As ondas geralmente têm alturas pequenas e a zona de arrebentação é estreita.

Valores de $\Omega > 6$ resultam em praias no estado dissipativo; que caracterizam-se por baixa declividade e apresentam sedimentos de textura fina; a energia das ondas é geralmente alta, com larga zona de arrebentação e a presença comum de barras submersas, onde as ondas dissipam a maior parte da energia antes de atingir a face praial.

Os valores de Ω entre 1 e 6 definem as praias de estado morfodinâmico intermediário, sendo caracterizadas por morfologia de barras paralelas e

perpendiculares a face praial. Wright & Short (1984) reconheceram 4 estados intermediários, com valores de Ω e características morfológicas próprias para a face praial e zona de surfe/arrebentação; com o aumento do valor deste parâmetro os estados morfodinâmicos são: banco e calha longitudinal; banco e praia de cúspides; bancos transversais e terraço de baixa-mar.

O estudo do transporte de partículas na zona de surfe é uma preocupação recorrente, devido à sua complexidade e importância para os engenheiros e pesquisadores da área. A maior parte das dificuldades neste tipo de pesquisa refere-se às condições adversas na zona de arrebentação durante as medições, e também aos recursos limitados de equipamentos ou às limitações em se representar adequadamente os fenômenos que ocorrem nesta zona através de modelagens. Embora estimar as quantidades de sedimentos transportados seja um importante subsídio para o manejo costeiro, estas estimativas também estão sujeitas a muitas suposições teóricas, podendo gerar resultados errôneos.

Apesar da importância de se conhecer o comportamento dos sedimentos na zona de surfe e arrebentação, existem muitas imprecisões. Segundo alguns autores (Castanho, 1966; Lanfredi & Framiñan, 1986; Kraus, 1987; Kamphuis, 1991; Van Rijn, 1993; Miller, 1999 e Elfrink & Baldock, 2002), é necessária a condução de experimentos melhor instrumentados, seja em ambiente natural seja em laboratório. Os estudos sobre o transporte de sedimentos na zona de surfe são escassos quando comparados com a grande quantidade de estudos realizados sobre o transporte em zonas marinhas profundas. Isto explica em parte a falta de conhecimento e de técnicas precisas quanto ao movimento de partículas na zona turbulenta onde a energia das ondas é dissipada (Fontoura, 2004).

No entanto, as investigações em laboratório, através de experimentos de micro e meso escala, têm sido aprofundadas com o avanço de novas tecnologias (e.g Van Rijn, 2002). O fato de estes experimentos serem rigidamente controlados propicia condições diferentes das encontradas em ambiente natural, mas tem a grande vantagem de explicar alguns processos fundamentais na dinâmica do transporte de partículas que não podem ser estudados em campo, como por exemplo, os limites do transporte por arraste (bedload).

2.1 TRABALHOS ANTERIORES

A utilização de armadilhas de sedimento (Kana, 1976, 1979; Inman, 1978; Thornton & Morris, 1978; Inman *et al.*, 1981; Kraus, 1987; Kraus & Dean, 1987; Wang *et al.*, 1998a) para medições do fluxo de partículas em suspensão na zona de surfe foi importante para substituir métodos previamente utilizados e que impunham inúmeras limitações, como o caso de traçadores radioativos, que são ambientalmente inviáveis. A principal desvantagem das armadilhas é a impossibilidade de sua utilização durante eventos meteorológicos extremos, que são justamente os eventos responsáveis pela maior mobilização de sedimentos na zona de surfe.

No Brasil e no mundo existem inúmeras tentativas de determinar o valor do transporte longitudinal, que vão desde a utilização de equações empíricas ou semi-empíricas utilizando dados locais do padrão de ondas, até as medições de campo com auxílio de equipamentos sofisticados.

Recentemente as atenções também se voltaram para o transporte dentro do espriamento. Masselink & Puleo (2006) constataram a sua importância principalmente em condições de baixa agitação da zona de surfe. A busca de um modelo geral que aproxime matematicamente o transporte dentro da zona de surfe tem sido o objetivo de muitos trabalhos, utilizando tanto dados de campo como de laboratório (e.g. Watts, 1953; Caldwell, 1956; Savage, 1962; Inman & Bagnold, 1963; Castanho, 1966; Komar, 1969; Longuet-Higgins, 1972; Van Rijn, 1984; Kamphuis *et al.*, 1986; Weggel & Perlin, 1988; Kamphuis, 1991, Schoonees & Theron, 1994 e Schoonees, 1996).

Wang *et al.* (1998a) utilizando as armadilhas desenvolvidas por Kraus (1987) realizaram medições em vinte e nove praias ao longo da costa sudeste dos Estados Unidos e no Golfo da Flórida, USA. Os valores encontrados foram associados com os perfis das praias, características das ondas na arrebentação e propriedades dos sedimentos. Foram também comparados com valores encontrados através das fórmulas do CERC (USACE, 1984) e Kamphuis (1991). Os valores medidos revelaram até 1/3 dos encontrados pela fórmula do CERC, mas muito próximos aos preditos pela fórmula de Kamphuis (1991).

Lanfredi & Framiñan (1986) ressaltaram a importância das componentes longitudinais do vento sobre as correntes longitudinais e deriva litorânea no caso de praias oceânicas abertas dominadas por ondas e ventos. Seus estudos foram realizados na praia de Union, província de Chubut, Argentina. As mesmas observações foram feitas por Hubertz (1986) e Ciavola *et al.* (1997).

Ciavola *et al.* (1997) e Weggel *et al.* (1988) observaram ainda, que as taxas de transporte determinadas a partir da corrente longitudinal dependem fortemente da largura da zona de surfe, uma das razões para que as taxas de transporte variem tão significativamente de uma praia para outra. Entretanto, quando se trata de taxas líquidas anuais, o melhor ajuste estatístico é encontrado através de uma distribuição normal de Gauss (Douglass, 1985).

Kumar *et al.* (2000) estudaram as correntes e o transporte longitudinal ao longo da costa de Kannirajapuram, Tamilnadu, Índia. Os autores utilizaram um banco de dados direcionais de ondas associadas com medições diárias da corrente longitudinal e da largura da zona de surfe pelo período de um ano. Foram observados dois picos de energia direcional, sugerindo a utilização das duas direções preferenciais de onda no cálculo da corrente e da deriva litorânea. As correntes longitudinais medidas foram comparadas com valores calculados através das equações de Longuet-Higgins (1970) e Galvin (1963) sendo que esta última apresentou a melhor aproximação com uma superestimação da ordem de 6,5% enquanto que a primeira ultrapassou os valores medidos em 32%.

Bayram *et al.* (2001) avaliaram o comportamento das equações de Bijker (1967), Engelund & Hansen (1967), Ackers & White (1973), Bailard & Inman (1981), Van Rijn (1984) e Watanabe (1992) com relação ao cálculo das taxas de transporte longitudinal de sedimentos dentro da zona de surfe, para condições de alta e baixa energia. Os valores encontrados foram comparados com dados de campo obtidos em campanhas realizadas na praia de Duck, NC, USA, e denominadas sucessivamente DUCK85, SUPERDUCK e SANDYDUCK. Os dois primeiros conduzidos sob condições de baixa energia de onda e o terceiro durante a ocorrência de tempestades costeiras. Segundo os autores a equação que melhor aproximou os dados ambientais, tanto para condições normais como para eventos extremos, foi a de Van Rijn (1984).

Alfredini (1999), usando dados hidrodinâmicos e morfométricos de vinte praias brasileiras do Rio Grande do Sul ao Piauí, determinou os valores totais e

líquidos da deriva litorânea utilizando as fórmulas de Caldwell (1956), Castanho (1966), CERC (USACE, 1984), Galvin (1963) e Kamphuis (1991). Os valores encontrados confirmaram a tendência de superestimação da fórmula do CERC enquanto que a fórmula de Kamphuis (1991) apresentou os melhores ajustes. A estas mesmas conclusões chegaram também Schoonees & Theron (1994) e Schoonees (1996), após analisarem a resposta de cinquenta e duas fórmulas de cálculo do transporte longitudinal disponíveis na literatura científica.

2.2 TEORIAS DO TRANSPORTE

Para entender melhor o estudo do transporte dos sedimentos marinhos é importante que se realize a sua separação em fenômenos que ocorrem além da arrebentação e fenômenos que ocorrem na zona de arrebentação até o espraçamento. Portanto, é importante que se diferencie o transporte que ocorre na face litorânea, a partir da linha de arrebentação e a face praial. Isto pode ser feito usando uma classificação que inclua a região onde ocorre o transporte; a direção segundo a qual o mesmo se processa e a posição das partículas transportadas em relação ao fundo.

Considerando a região em que o transporte ocorre, este pode ser dividido em movimentos de partículas dentro da face litorânea (incluindo a zona de surfe e arrebentação) e movimentos dentro da face praial (zona de espraçamento). Segundo a terminologia proposta por Angulo (1992) a face litorânea é compreendida entre a primeira linha de quebra proporcionada pela diminuição da profundidade da água e a linha de maré baixa (Figura 1); enquanto que a zona da face praial tem o limite oceânico na linha da maré mais baixa até a crista da berma (Figura 1).

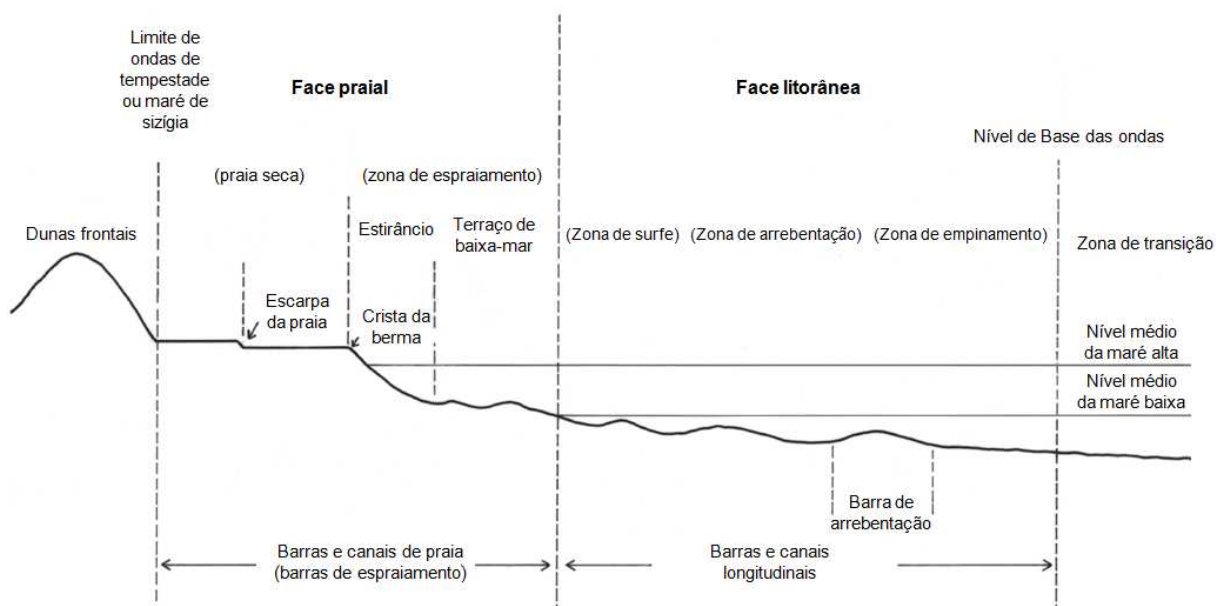


Figura 1: Perfil praiar contendo a terminologia utilizada neste trabalho (modificado de Angulo, 1992).

No sentido do mar aberto e fora da região da face litorânea, (zona de transição), o transporte mais significativo deriva do movimento oscilatório das partículas próximas ao leito marinho, devido às correntes geradas pela flutuação do campo de pressões das ondas. Este tipo de transporte é mais bem fundamentado e conhecido do que o transporte que ocorre dentro da zona de arrebentação, surfe e no espraçamento. Isto se deve principalmente às condições hidrodinâmicas desta zona, que são mais favoráveis para instrumentação e coleta de dados (Fontoura, 2004). Entretanto, o transporte nesta região apresenta resultantes menos significativas, quando comparadas às resultantes do transporte que ocorre entre a linha de arrebentação e a face litorânea.

Adicionalmente, na zona de surfe, espraçamento e arrebentação existe uma maior complexidade entre os processos envolvidos, devido à grande quantidade de variáveis responsáveis pelo movimento dos fluídos e partículas. As principais dificuldades estão relacionadas às restrições na coleta de dados e também limitações nas descrições matemáticas destes processos, que são bastante complexas, pois os sedimentos sofrem ação de vários agentes transportadores como ventos, ondas, marés e correntes litorâneas. A complexidade fica muito maior considerando que os processos estão sempre associados e não são lineares, dificultando delimitações e também generalizações.

Entretanto, é nesta zona de grande dinâmica que se encontra o transporte sedimentar mais importante para o gerenciamento costeiro, pois nela ocorre a mobilização de grandes massas de areia, resultando em taxas de transporte substanciais. Esta questão se tornou tema de muitas discussões, pois as principais obras de engenharia costeira são construídas muito próximas a estes limites de grande mobilidade.

Os processos que ocorrem nos dois ambientes próximos à linha de costa (zona de surfe e espraiamento) são diferentes, porém os dois participam com importantes parcelas do transporte total e sua relevância varia em função da topografia da praia e das condições hidrodinâmicas e meteorológicas predominantes (Masselink & Puleo, 2006).

Em relação à direção, o transporte de partículas é usualmente dividido em transversal e longitudinal. Estes movimentos de partículas podem estar associados ou não e são bastante distintos. Os primeiros são movimentos numa direção transversal às linhas batimétricas, ao longo do perfil da praia, e são basicamente bidirecionais. Porém, mesmo que as quantidades de sedimentos transportadas sejam geralmente de grande magnitude, a resultante anual é muitas vezes nula e a praia irá variar entre as condições extremas de acreção e erosão (perfis de bom tempo e perfis de mau tempo, respectivamente).

Já o transporte longitudinal, que é definido por alguns autores como deriva litorânea, ocorre pela formação de correntes paralelas à linha de costa. Estas correntes longitudinais ocorrem quando as ondas incidentes na praia se aproximam com certo ângulo em relação à linha de costa (as cristas de onda não são paralelas) e isto provoca um gradiente perpendicular de "fluxo de momento" ou tensão radiante (Longuet-Higgins, 1970). Este movimento é comumente unidirecional, porém, se existir bi-direcionalidade sempre haverá uma resultante de transporte e um sentido predominante definido. Assim, o equilíbrio em uma praia sujeita ao transporte longitudinal será dinâmico, e o seu rompimento por ações antrópicas ou naturais será causa das alterações da linha de costa.

Em relação à posição da partícula em movimento e o fundo, o transporte pode ser dividido em transporte por arraste de fundo e por suspensão. O transporte por arraste é basicamente o movimento de partículas muito próximas ao leito marinho, através de rolamento, deslizamento e também saltação. Einstein (1950) e Bagnold (1956) foram pioneiros na descrição destes diferentes tipos de transporte.

Segundo Einstein (1950), o transporte por arraste ocorre próximo ao fundo dentro de uma camada com espessura igual a duas vezes o diâmetro da partícula média (D_{50}). Bagnold (1956) define que neste tipo de movimento o contato sucessivo das partículas com o fundo (saltação) é limitado apenas pelos efeitos da gravidade.

Tendo em vista os limites do transporte por arraste, o transporte por suspensão é sem dúvida o modo mais importante de movimentação dos sedimentos dentro da zona de surfe, podendo ocupar toda a coluna d'água. Os sedimentos colocados em suspensão pelo cisalhamento das correntes no fundo e pela ação turbulenta da quebra das ondas no fundo são transportados pela corrente longitudinal (Abbott & Francis, 1977). A inclusão de partículas de areia na coluna d'água por ação cisalhante das correntes se inicia quando a velocidade de cisalhamento próximo ao fundo excede o valor da velocidade crítica para começo do movimento (Soulsby, 1997).

Portanto, as partículas inicialmente apresentam movimentos de deslizamento e rolamento e à medida que a velocidade aumenta, passam a realizar pequenos saltos. Com a continuidade no aumento do valor da velocidade média do fluido, a velocidade de cisalhamento de fundo rapidamente excede o valor da velocidade de queda da partícula, colocando-as em suspensão (Abbott & Francis, 1977).

A concentração de partículas de sedimentos no meio aquoso geralmente decresce com o afastamento do fundo e as taxas dessa diminuição estão relacionadas com a velocidade de decantação das partículas e com a velocidade de cisalhamento de fundo. Nas zonas de alta concentração de sedimentos próximas do fundo, o valor da velocidade de queda também é afetado pelo fluxo de retorno do fluido deslocado pelas ondas e correntes (Fontoura, 2004).

As formas de leito presentes no fundo são importantes na incorporação de sedimentos na coluna de água por ação de correntes, pois a irregularidade do fluxo, sobre fundos ondulados dá origem ao surgimento de vórtices próximo às suas cristas, capazes de mobilizar e manter em suspensão uma quantidade maior de partículas (Soulsby, 1997).

Contudo, o processo de quebra das ondas é considerado o fator mais importante na inclusão de sedimentos no meio fluido. Ao quebrar a onda provoca o surgimento de uma região de intenso movimento rotacional da água, gerando vórtices que atuam sobre o fundo, lançando partículas na coluna d'água. Por isso

existem concentrações muito maiores de sedimentos em suspensão nas regiões próximas ao ponto de quebra das ondas e nos bancos.

Peters & Dette (1999) afirmam que a zona do banco é dominada pelos movimentos turbulentos gerados pela quebra das ondas, que por sua vez estão diretamente relacionados com o tipo de quebra destas.

O tipo de quebra se refere à forma das ondas no momento da quebra, que pode ser classificada em quatro tipos (Galvin, 1968): deslizante, mergulhante, colapsante e ascendente. Nas ondas deslizantes, a crista da onda se torna instável e escorrega pela própria face da onda, produzindo uma superfície espumosa. As ondas mergulhantes apresentam uma crista que se curva e atinge a base da onda, resultando em um forte impacto. Já as ondas colapsantes apresentam uma crista que não quebra, enquanto a parte de baixo da onda tem grande esbeltez e quebra, produzindo um movimento irregular e turbulento de água. As cristas das ondas ascendentes não quebram e a face da onda avança em direção à linha de costa com a menor movimentação de água.

Segundo Van Rijn (1993) ondas que quebram tipo mergulhante provocam a suspensão de uma quantidade de sedimentos até dez vezes maior do que as ondas do tipo deslizante. Por outro lado, a quebra tipo deslizante apresenta propriedades de mistura menos intensas que a mergulhante, pois os vórtices formados durante a quebra têm menor tamanho e ficam restritos à superfície do mar, raramente atingindo as camadas mais próximas do fundo (Miller, 1976).

Em síntese, as concentrações de sedimentos dentro da zona de arrebenção apresentam uma distribuição homogênea na área do banco, onde os processos de turbulência ocorrem com mais intensidade, e um formato exponencial entre o banco e a linha de praia, devido ao acelerado processo de decantação das partículas (Peters & Dette, 1999).

Para a zona do espraimento, além dos processos de movimento de partículas e modos de transporte já citados, ainda devem ser considerados o nível do lençol freático e a inclinação da face litorânea. Elfrink & Baldock (2002) consideram que a importância do transporte no espraimento é maior durante condições de calmaria, podendo representar até 50% do total da deriva litorânea. Nestes casos o transporte pelas correntes longitudinais e transversais é severamente reduzido se comparado ao transporte durante tempestades, que ocorre predominantemente na zona de quebra de ondas.

Segundo Masselink & Puleo (2006) o espraçamento não pode ser considerado de forma isolada da zona de surfe, e estas duas zonas estão conectadas através de processos de retro-alimentação.

2.3 TEORIAS DO TRANSPORTE LONGITUDINAL

O transporte longitudinal é estritamente associado com as correntes geradas por ondas (Fredsoe & Deigaard 1992), e muitas fórmulas usadas para calcular o fluxo de partículas transportado por estas correntes se baseiam em argumentos de que os sedimentos são mobilizados do fundo pelas ondas e transportados ao longo da costa pelas correntes longitudinais (Longuet-Higgins, 1972; Inman & Bagnold, 1963). Entretanto, a mobilização também pode ocorrer através da ação das correntes e comumente por ação de ondas e correntes associadas (Soulsby, 1997).

Quando as ondas quebram na zona de surfe, elas liberam momento, causando uma “tensão radiante” (Soulsby, 1997). Existem basicamente duas componentes dessa tensão radiante. A componente perpendicular à linha de costa empurra volumes de água em direção ao continente e causa um aumento momentâneo do nível médio da água. Conseqüentemente, é gerado um declive na superfície da água, que equilibra o gradiente da tensão radiante e gera uma corrente no sentido onde o nível da água está mais baixo (Soulsby, 1997). Para ondas que incidem na costa obliquamente há uma componente longitudinal da tensão radiante, e o seu gradiente dá origem a uma corrente longitudinal na zona de surfe. Esta corrente é balanceada pela fricção com o fundo, e gera o transporte de partículas em suspensão, conhecido como deriva litorânea (Soulsby, 1997).

Esta força de fricção exercida pelo fluxo sobre o fundo (em unidades por área) é expressa nos termos da tensão de cisalhamento (Soulsby, 1997). Existem duas formas principais de expressar a tensão de cisalhamento: como unidades de área (N m^{-2}), representado pela equação ($\tau_0 = \rho u_*^2$); e como unidades de velocidade (m s^{-1}), representado pela equação ($U_* = (\tau_0/\rho)^{1/2}$). O parâmetro τ_0 é amplamente usado em estudos relacionados ao transporte longitudinal de sedimentos, porque as velocidades das correntes podem ser medidas ou estimadas.

A tensão de cisalhamento gerada não depende somente da velocidade do fluxo, mas da rugosidade do fundo e das formas de leito submersas (Soulsby, 1997). A escolha por uma rugosidade de fundo apropriada (k_s) é um passo decisivo para melhorar as previsões do transporte de sedimentos (Van Rijn *et al.*, 2001). Por exemplo, em leitos de fundo planos, a utilização de um valor de k_s maior (obtido em laboratório) pode resultar em previsões de um volume muito maior de sedimentos sendo transportados próximo ao fundo, do que encontrado na natureza e ainda, levar a previsões subestimadas do material transportado em suspensão (Van Rijn *et al.*, 2001).

Da mesma forma, essas incertezas podem acontecer para leitos com formas de fundo, como marcas onduladas (ripples), pois os valores de k_s obtidos por experimentos laboratoriais resultam em valores maiores que os encontrados em medições de campo. Visto que a maioria dos modelos recentes tem sido calibrada através de medições de campo, há uma tendência que suas previsões produzam resultados mais realistas (Van Rijn *et al.*, 2001).

O fato que qualquer corrente fluindo acima do leito submerso é capaz de “sentir” o fundo, e sofrer um processo de fricção, gera uma camada limite turbulenta, tipicamente com alguns metros de espessura (Fredsoe & Deigaard 1992). Na zona de surfe, considerada uma região de águas rasas, a camada turbulenta ocupa toda a profundidade (Soulsby, 1997).

Dentro da camada limite, a velocidade da corrente aumenta de acordo com a profundidade, partindo de zero no fundo até o máximo próximo à superfície, com o aumento mais rápido de velocidade observado próximo ao fundo (Van Rijn, 1984). O modo como estas correntes apresentam um perfil logarítmico de velocidade, aumentando do fundo para a superfície, é conhecido como perfil de velocidade de corrente.

Considerando que muitos processos agem concomitantemente e interagem entre si na geração das correntes longitudinais, é necessário que os modelos incluam grande parte destes parâmetros. Alguns coeficientes como, por exemplo, o parâmetro de Von Kármán; que é associado com o perfil logarítmico de velocidade de um fluido turbulento próximo ao fundo; são necessários para estudos detalhados onde a velocidade da corrente não foi medida em todas as profundidades da coluna d'água, possibilitando uma aproximação dos reais valores.

Por outro lado, é essencial observar as propriedades das partículas em suspensão. A distribuição granulométrica de uma amostra de sedimentos é utilizada principalmente para a obtenção das médias e dos percentis (D_{50} D_{90} , onde 50% ou 90% do sedimento – em volume – têm um tamanho de grão mais fino do que a média). Outras propriedades importantes comumente usadas em fórmulas são a densidade e a porosidade, associadas ao tamanho do grão e à composição do sedimento.

2.4 DEFINIÇÃO E ASPECTOS HISTÓRICOS DOS MODELOS DE TRANSPORTE LONGITUDINAL

A taxa de transporte longitudinal pode ser definida como a quantidade de sedimento, por unidade de tempo, que passa através de um plano (de dimensões conhecidas) perpendicular à direção do fluxo (Soulsby, 1997). O total de sedimentos pode ser medido em massa ou volume, então no sistema internacional de unidades (SI), a taxa de transporte pode ser dada em: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ou $\text{m}^3 \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ($=\text{m}^2 \text{s}^{-1}$). Outras unidades de medida mais práticas em engenharia costeira também são comuns, como toneladas por dia, obviamente, utilizando as conversões adequadas.

De acordo com o Manual de Proteção Costeira (Shore Protection Manual - USACE, 1984), existem três tipos fundamentais de modelos para calcular taxas de transporte longitudinal.

Os modelos tridimensionais objetivam descrever as elevações batimétricas, que podem variar nas direções transversal e longitudinal à linha de costa. Esses modelos podem ser baseados em transformações de onda (i.e. refração, difração) e circulação que resolvam a complexidade da batimetria e das estruturas costeiras. Entretanto, estes modelos não são indicados para a evolução da linha de costa no longo termo, porque são computacionalmente complexos. Estes modelos também são baseados em derivações muito simples de coeficientes empíricos importantes, como alguns citados anteriormente (constante de Von Kármán). Por isso, a integração das distribuições locais do transporte de sedimento, por longos períodos

de tempo, podem levar a estimativas errôneas, considerando que pequenas imprecisões serão amplificadas numa simulação de larga escala.

Os modelos tridimensionais esquemáticos simplificam as equações dos modelos anteriores, restringindo o formato do perfil modelado ou calculando taxas globais do transporte em vez de taxas pontuais. Estes modelos ainda não têm uma grande aplicação devido à complexidade e por necessitarem de recursos computacionais consideráveis (USACE, 1984).

O terceiro tipo é o modelo bidimensional, que pode simular as mudanças na linha de costa de forma mais prática, porque são formulados através de taxas de volume de transporte e consequentemente possuem um número menor de coeficientes e aplicações matemáticas. Apesar de não fornecer tantos detalhes quanto os modelos tridimensionais, os bidimensionais podem ser ajustados de acordo com os processos hidrodinâmicos locais e incluir os efeitos integrados destes.

Adicionalmente, existem inúmeras fórmulas capazes de calcular as taxas de transporte longitudinal pontualmente, os chamados modelos unidimensionais (1D). A primeira fórmula bastante detalhada foi sugerida por Bijker (1971), usando o modelo de correntes longitudinais de Longuet-Higgins (1970) para uma praia com declive constante, combinado com um modelo de transporte sedimentar para ondas e correntes (Fredsoe & Deigaard, 1992).

Apesar de o modelo de Bijker (1971) ter sido um dos primeiros, ainda é comumente usado por engenheiros devido à sua facilidade de aplicação e porque resulta em estimativas similares aos modelos mais recentes e complexos (Van Rijn *et al.*, 2001). Outra vantagem importante é que este modelo foi baseado em conceitos clássicos do transporte sedimentar, diferenciando o transporte em suspensão do transporte por arraste, e não foi baseado em curvas de variação empíricas, que apenas se ajustam aos dados do transporte (Davies & Villaret, 2002).

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O litoral do estado do Paraná situa-se no sul do Brasil (Figura 2) e a linha de costa da planície costeira da Praia de Leste é uma porção de aproximadamente 35 km, limitada pelas desembocaduras das baías de Paranaguá e Guaratuba, no norte e no sul, respectivamente. Os pontos de coleta estão indicados na Figura 2 e são: Atami, Caravelas e Praia Brava.

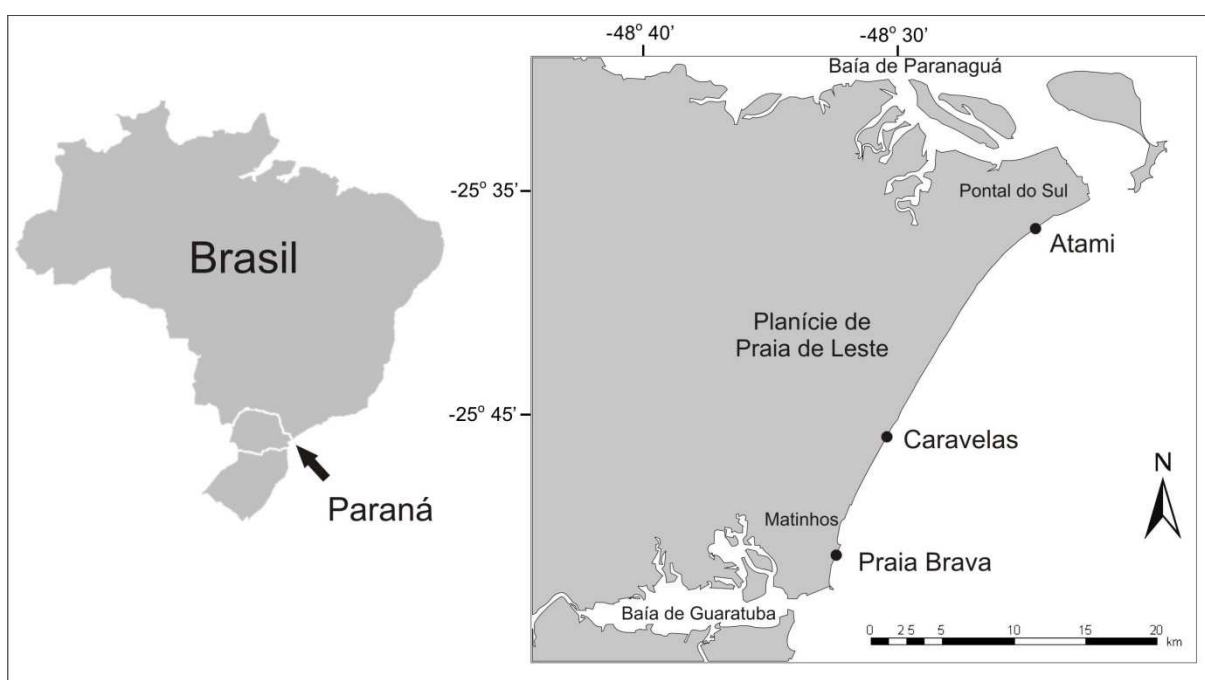


Figura 2: Visão geral da área de estudo, no litoral sul do Paraná.

A área entre a Serra do Mar e a linha de costa é representada por uma ampla planície costeira, formada através das contínuas variações do nível do mar durante o Quaternário, sendo que as praias são exclusivamente compostas por sedimentos de tamanho de grão areia.

No Estado do Paraná a costa pode ser dividida em três setores, em função da presença das baías de Paranaguá e Guaratuba. Ao norte da baía de Paranaguá encontra-se a planície de Superagüi ou planície Norte, entre Pontal do Sul e Caiobá encontra-se a planície da Praia de Leste, e ao sul da baía de Guaratuba a planície Sul ou do Brejatuba.

Existem três tipos principais de costas, classificadas por Angulo & Araújo (1996) e determinadas de acordo com as características da dinâmica costeira e a configuração geomorfológica: (1) As costas que ocorrem no interior dos estuários são chamadas estuarinas ou protegidas, e podem não apresentar influência significativa da dinâmica das desembocaduras, mas sofrem influência da dinâmica dominada pelas marés. São caracterizadas por extensas planícies de marés ocupadas principalmente por manguezais. (2) As costas oceânicas também não apresentam influência significativa das desembocaduras estuarinas, pois estão voltadas ao oceano. São dominadas pela ação de ondas e correntes de deriva litorânea, apresentando processos de erosão e sedimentação sazonais (Angulo & Araújo, 1996). (3) As costas associadas às desembocaduras, que se caracterizam pela ocorrência de praias arenosas e, em alguns locais protegidos, por pequenas planícies de marés. Ocorrem próximas às desembocaduras tanto na parte interna dos estuários como nas áreas de mar aberto e são dominadas tanto por ondas e correntes de deriva como correntes de maré.

No Paraná, as costas estuarinas ou protegidas se estendem por 1.316,8 km; as oceânicas ou de mar aberto por 61,1 km e as costas associadas às desembocaduras possuem extensão de 105,1km (Angulo & Araújo, 1996).

3.1 GEOLOGIA

Segundo Angulo (1992), a planície costeira do Estado do Paraná é composta principalmente por sedimentos quaternários depositados em ambientes continentais e marinhos. Os sedimentos continentais são representados por cascalhos com matriz areno-argilosa, localizados nas proximidades do sopé de serras, na forma de depósitos de leques, talus e colúvios. Já os sedimentos marinhos são depósitos de areias finas a muito finas, quartzosas e bem selecionadas constituindo feixes de cordões litorâneos orientados paralelamente à linha de costa atual no sentido sudoeste-nordeste, ocorrendo na forma de terraços.

Os sedimentos costeiros pertencem a dois tipos de sistema principais: o de planície costeira com cordões litorâneos, e o estuarino. Ambos são representados tanto por ambientes antigos formados durante períodos em que o mar tinha níveis relativos mais altos que o atual, como por ambientes atuais, tais como praias, planícies de maré, deltas de maré e dunas frontais (Angulo, 1992). Sedimentos paleo-estuarinos arenosos e areno-argilosos ocorrem em áreas baixas e associadas ao fundo de antigos vales fluviais.

A partir de descrições detalhadas de fácies sedimentares e de datações de ^{14}C , Souza *et al.* (2003) propuseram um modelo evolutivo para a barreira holocênica na região de Paranaguá (ao norte da área de estudo). A associação de fácies foi interpretada como sendo uma seqüência regressiva depositada em ambientes de plataforma interna, face litorânea, face praial, pós-praia e dunas frontais, sobre um substrato pleistocênico de plataforma rasa. A idade proposta para a barreira na área é de 4.000 a 3.000 anos A. P., baseando-se em datações de ^{14}C obtidas a partir de conchas de moluscos.

3.2 PARÂMETROS FÍSICOS DO LITORAL PARANAENSE

3.2.1 Clima

Segundo a classificação de Köppen, o clima da planície costeira paranaense é do tipo Cfa, subtropical úmido mesotérmico com verão quente. O mesmo tipo climático ocorre na Serra do Mar até 700 m de altitude, a partir da qual passa para tipo Cfb, subtropical úmido mesotérmico com verão fresco (Ipardes 1990, 1991). A temperatura média anual estimada na planície costeira varia entre 20,8° C e 22° C, caindo até 13,1° C nas partes mais elevadas da Serra do Mar (Angulo *et al.*, 2004).

A origem dos ventos regionais que afetam a área de estudo, posicionada próxima à latitude 25° S (transição entre a zona tropical e a temperada), relaciona-se

basicamente aos dois sistemas de alta pressão atuantes: o Anticiclone Tropical do Atlântico Sul e o Anticiclone Migratório Polar. Estes dois sistemas alternam sua influência sobre a costa, mas há dominância de ventos de quadrante nordeste entre os meses de setembro a março e de sudoeste de abril a agosto. (Nimer, 1977).

As maiores perturbações atmosféricas na região Sul do Brasil são consideradas os sistemas frontais, que se propagam de sudoeste para nordeste ao longo da costa, com periodicidade de 6 a 7 passagens num período de 30 dias, e maior ocorrência de frentes frias no inverno (Oliveira, 1986). Calliari & Klein (1993) afirmam que a dinâmica praial na costa sul brasileira é regulada, principalmente, pelos fenômenos associados à passagem de frentes meteorológicas ou frentes polares.

De acordo com Quadros (2002), existe uma forte correlação entre a passagem de sistemas frontais e eventos erosivos nas praias do litoral central do Paraná. Os sistemas ciclônicos de baixa pressão proporcionam extensas pistas de vento, que migram em direção à costa e associadas às marés de sizígia podem causar elevações no nível do mar e estender a faixa de ação das ondas até as dunas ou zonas urbanizadas, causando erosão.

3.2.2 Marés

O regime de marés é um fator importante na determinação da geomorfologia de áreas costeiras, mas nas costas oceânicas do Paraná as marés astronômicas são de pequena amplitude e consideradas secundárias em relação às variações do nível do mar associadas às forçantes meteorológicas. Dados do DHN (Diretoria de Hidrografia e Navegação) revelam uma amplitude média das marés inferior a 1,5 m, podendo esta costa ser classificada segundo Davies & Hayes (1984) como uma costa do tipo micromaré (amplitudes menores que 2 m).

Segundo Harari & Camargo (1994), foi verificada uma amplitude de maré de 1,8 m na embocadura da baía de Paranaguá, a qual decresceu ao longo da costa tanto para sul quanto para norte. A análise de uma maré meteorológica na Baía de Paranaguá em 18 de agosto de 1993 revelou um aumento de 0,80 m do nível

previsto Marone & Camargo (1994), Este fenômeno seria causado pelo represamento e empilhamento da massa d'água na zona costeira.

3.2.3 Ondas

A costa do Paraná é dominada pela ação das ondas, que podem ser de três tipos e ocorrer simultaneamente: (A) ondulação ou "swell"; (B) vagas ou "sea" e (C) ondas de tempestade ou "storm waves". As ondulações (swell) são ondas mais regulares, de período mais longo, menor esbeltez e provenientes de tempestades geradas comumente a milhares de quilômetros da costa. As vagas são ondas geradas por ventos locais e se apresentam bastante irregulares, com elevada esbeltez e cristas agudas. São muito variadas quanto ao período, comprimento, altura e direção de propagação, estando muitas vezes sobrepostas à ondulação.

Porém, contrariamente às ondulações, as vagas são provocadas por ventos constantes, que definem a direção predominante de incidência. As ondas de tempestade são menos freqüentes, mas as que chegam à praia com maior energia. São formadas por fortes ventos associados às tempestades próximas ou dentro da região costeira, que agregados às marés meteorológicas, causam expressivos impactos na costa, como processos erosivos e ampla movimentação de sedimentos pelas correntes longitudinais e transversais.

De acordo com Tessler (1988), os padrões de onda no Paraná são mais influenciados por ondas provenientes de tempestades em mar aberto (swells), e em menor escala, pelos ventos locais. Medições de ondas realizadas em 1982 em Praia de Leste mostraram dois padrões distintos, um vindo de nordeste e outro de sudeste. O primeiro está relacionado com a direção do vento, associada aos sistemas de alta pressão atuantes na região, enquanto o segundo é originado pela passagem das frentes frias atravessando a costa sul brasileira e gerando ondas de tempestade (PORTOBRÁS, 1983).

Segundo estudos realizados pelo Laboratório de Física Marinha (LFM/CEM-UFPR), nos períodos de 17/01/97 a 06/02/97 (verão) e 14/08/97 a 19/08/97 (inverno), foi evidenciado que em períodos de verão as ondas que adentram a baía

de Paranaguá apresentam alturas significativas menores que 0,5 m, com períodos da ordem de 7 s. Ondas menores, com alturas de até 0,25 m, apresentam períodos chegando a atingir até 12 s. A direção média principal de chegada de ondas é SE (Marone *et al.*, 1997). Ainda, segundo os mesmos autores, as ondas possuem uma característica não linear de propagação, implicando em um maior poder energético na ressuspensão e no transporte de sedimentos.

Para o período de inverno as ondas apresentam alturas significativas menores que 0,3 m, com períodos da ordem de 5 s. A direção principal de chegada de ondas é S-SE, ligeiramente diferente da situação encontrada no verão (Marone *et al.*, 1997). Contudo, alturas de 0,8 m e períodos de 9,4 s foram medidos após tempestades na Praia Brava (Borzzone *et al.*, 1999).

Através de uma imagem Landsat, Noernberg (2001) caracterizou o comportamento das ondas incidentes na zona costeira adjacente à desembocadura sul da Baía de Paranaguá, na profundidade de 20 m e em evento pós-frontal, para o dia 26 de setembro de 1999. Os resultados obtidos foram: direção de propagação aproximada de 115°; comprimento de onda aproximado de 130 m e período de onda de 9,13 s.

3.2.4 Corrente longitudinal e transporte de sedimentos

As correntes longitudinais e perpendiculares à linha de costa e, conseqüentemente, o transporte de sedimentos ao longo da praia são fortemente governadas pelo padrão de ondas e pela batimetria. As correntes de retorno são bastante comuns nessa região e podem originar grandes variações verticais no volume de sedimento, principalmente na região central próxima ao balneário de Caravelas (Quadros, 2002).

O predomínio de ondas do quadrante sul - sudeste gera uma deriva litorânea orientada para norte. Segundo Angulo (1995), a ocorrência de deriva litorânea para norte pode ser observada na orientação das desembocaduras fluviais e morfologia dos deltas de vazante dos estuários de Paranaguá e Guaratuba. O lançamento de derivadores nos canais Norte e da Galheta confirmou que as correntes

predominantes na zona costeira adjacente ao complexo estuarino de Paranaguá são preferencialmente para norte (Marone *et al.*, 1995).

Possivelmente o transporte em direção ao sul é comum para os meses de verão, com ventos predominantes de nordeste atuando sobre uma grande pista (*fetch*) e gerando as ondulações características. Na imagem de satélite da Figura 3 é possível visualizar a pluma de sedimentos formada próxima à costa, derivando para sul. Portanto, considerar o transporte bi-direcional nesta faixa costeira é necessário para compreender o balanço sedimentar da região.

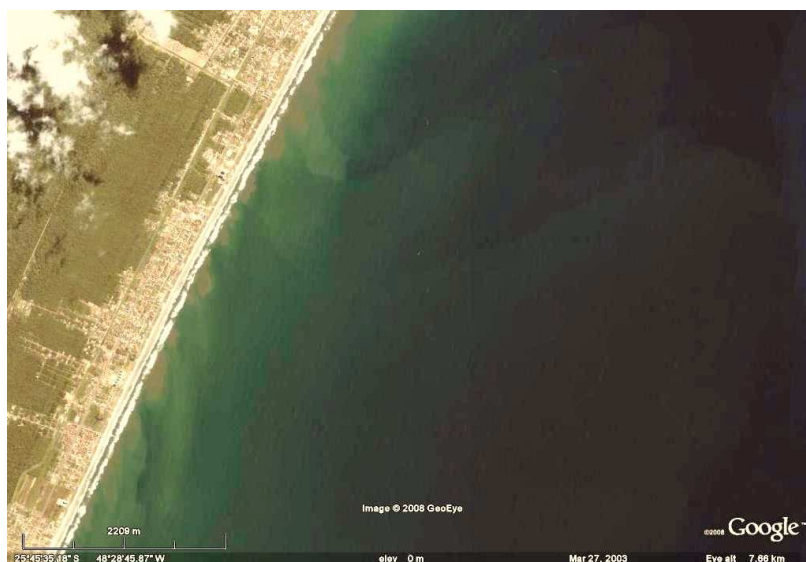


Figura 3: Imagem de satélite mostrando evidências do transporte longitudinal de sedimentos no fim do verão - 27 de março de 2003 (Fonte: Google Earth, acessado em julho de 2008).

3.3 PONTOS DE COLETA

O estudo realizado envolveu coletas em três pontos do arco praial, entre os municípios de Pontal do Paraná e Matinhos (ver Figura 2).

3.3.1 Balneário Atami

O balneário Atami localiza-se nas adjacências da desembocadura sul do complexo estuarino de Paranaguá, orientado no sentido sudoeste – nordeste (Figura 4). Ao contrário de praias oceânicas, as praias que estão associadas aos complexos estuarinos possuem uma dinâmica particular, e apresentam intensos processos de erosão e progradação associados à mobilidade dos deltas de maré.

Outro fator importante que pode influenciar a dinâmica sedimentar desta zona é a interferência antrópica através da fixação de um canal entre os anos de 1954 e 1965, que contribuiu para uma alteração no fluxo natural de sedimentos e na migração dos bancos associados aos deltas de desembocadura (Figura 4).



Figura 4: Localização do balneário Atami, próximo à desembocadura da baía de Paranaguá (Foto: Paulo Mayer - 2007).

Este guia corrente foi construído para facilitar a saída de embarcações em Pontal do Sul (aproximadamente 2 km do balneário Atami), mas provocou um efeito de molhe hidráulico, interceptando a deriva. Em estudo utilizando fotos aéreas obtidas anteriormente à fixação do canal (1954), Angulo (1993) identificou que os esporões arenosos migravam em direção ao interior da baía de Paranaguá.

Posteriormente, uma foto de 1980 mostrava o desaparecimento dos esporões e recuo da linha de costa na área interior da baía, de aproximadamente 150 m, enquanto a área de Pontal do Sul apresentou intensa sedimentação (Angulo, 1993).

Noernberg (2001) determinou que, entre 1985 e 1997, o avanço máximo da linha de costa foi de 321 metros em Pontal do Sul. A partir de 1997, a praia apresentou um padrão erosivo, ocorrendo recuos superiores a 200 metros entre 1997 e 2000. As mudanças na morfologia da costa foram atribuídas por Angulo (1999) às variações na configuração das barras do delta de maré vazante, que alterariam o padrão de refração das ondas. Esta dinâmica associada aos deltas pode afetar o balneário Atami, pela proximidade entre as duas regiões.

Os sedimentos desta praia são compostos por areias quartzosas finas e muito finas, muito bem selecionadas (Soares *et al.*, 1996). Segundo Bigarella *et al.* (1978), o diâmetro médio da areia das praias aumenta de Pontal do Sul para Praia de Leste (região central da planície), e decresce em direção a Matinhos. Entretanto, as areias em Matinhos não se apresentam tão finas como as de Pontal do Sul. O estado morfodinâmico da praia do Atami é intermediário a dissipativo a maior parte do ano (Quadros, 2002).

3.3.2 Balneário Caravelas

Neste ponto, ao contrário do que ocorre no arco praial próximo à Pontal do Sul, o estado morfodinâmico da praia é intermediário grande parte do ano (Quadros, 2002). A grande quantidade de dados existentes sobre as variações dos perfis praias indica que esta zona, apesar de ser uma das mais expostas do litoral paranaense, não apresenta retrações ou progressões da linha de costa substanciais. Geralmente são observadas feições erosivas nas áreas próximas às dunas, indicando escarpamento e nível do mar acima do normal causado por marés meteorológicas oriundas da passagem de frentes frias na região.

Os perfis indicados na Figura 5 mostram um contorno mais côncavo para o balneário Caravelas (Figura 5a) do que para o Balneário Atami (Figura 5b). Segundo Quadros (2002), existe uma grande mobilidade no perfil vertical, onde uma

diminuição de até dois metros foi identificada no perfil Caravelas, porém com deposição de sedimentos nas barras longitudinais (a 70 metros mar adentro), não interferindo no balanço volumétrico total de forma significativa.

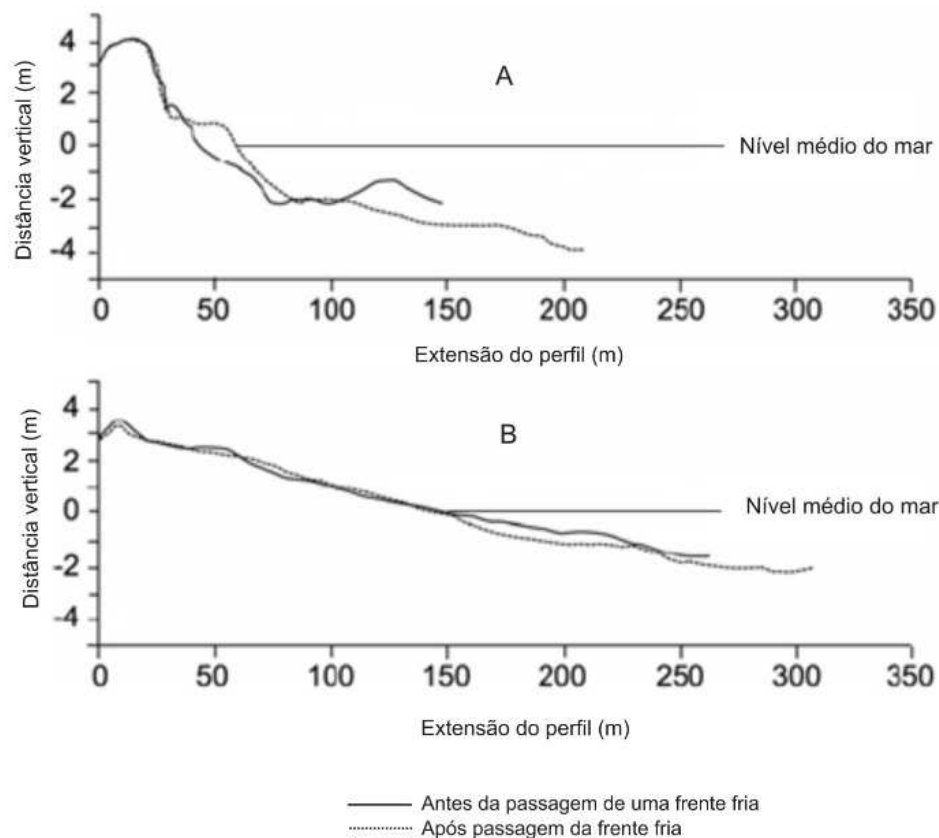


Figura 5: Diferenças entre os perfis de praia para o balneário Caravelas (a) e para o balneário Atami (b). Adaptado de Quadros (2002).

3.3.3 Balneário Praia Brava

A praia Brava, localizada no município de Matinhos, é considerada intermediária (Quadros, 2002) e possui aproximadamente 3 km de extensão. Os problemas erosivos apareceram desde o início da construção de uma rua na beira mar, e consequente ocupação da orla por empreendimentos imobiliários na década de 70. Complementadas por uma grande perda da vegetação local, essas interferências antrópicas tornaram essa porção do litoral bastante suscetível às

elevações no nível do mar causadas por marés meteorológicas e também a influência de ondas de tempestade.

Na parte central da praia foi necessário aterrar algumas áreas do campo de dunas para que a estrada beira-mar fosse construída, a qual tem uma configuração reta ao longo da praia, sem considerar a natural curvatura geomorfológica existente (Angulo, 1984). Em 1983, duas obras de contenção foram colocadas obliquamente à linha de costa com objetivo de acumular sedimentos e conter a erosão, protegendo as propriedades próximas à beira mar (Figura 6 - esquerda). Esses espigões foram rapidamente enterrados permitindo acumulação temporária de sedimentos, entretanto, também indicaram como a dinâmica praial é intensa.



Figura 6: À esquerda os efeitos da erosão na praia Brava até o ano de 1983, depois da rápida ocupação desta área, e os espigões colocados na praia – indicados pelas flechas (Fonte: <http://www.netpar.com.br/lindroth>). À direita o estado da praia no ano de 2007.

Em 1985 uma forte ressaca removeu grandes quantidades de sedimento da porção emersa da praia, colocando todas as propriedades em risco novamente. Outro projeto foi elaborado numa tentativa de recuperar a praia, onde sistemas de muros de gabião foram usados para proteger uma área de 750 m, nas partes sul e central da praia. Outros espigões também feitos de gabião foram colocados transversalmente à praia para acelerar a deposição, e para fixar um canal de descarga pluvial, prevenindo perda de sedimentos.

A parte mais ao sul da praia Brava apresentou um outro tipo de erosão, relacionada à dinâmica sedimentar estuarina próxima à baía de Guaratuba. Nesta área as barras arenosas eram muito bem definidas até o ano de 1963, avançando

em direção à linha de costa e depositando sedimentos, que aumentaram a largura da praia (Angulo, 1993b). Na mesma década, as construções se intensificaram, ocupando amplamente essa nova zona formada (Angulo, 1993b).

Entretanto, na década de 80 as barras arenosas migraram aproximadamente 300 m em sentido ao norte, originando um processo erosivo na área previamente ocupada. Entre 1980 e 1983, as barras continuaram a migrar, e os prédios e casas construídas naquela área impediram o estabelecimento de um novo balanço sedimentar, demandando intervenções e trabalhos de contenção da erosão (Angulo, 1993b).

A mobilidade praial no litoral de Matinhos foi obtida a partir de interpretações de fotografias aéreas de diversos anos (1954, 1969, 1980 e 1997), onde foram traçadas as linhas de costas (no nível de base das dunas) e mensuradas suas variações (Bessa, 2003). Entre 1954 e 1997 houve progradação na Praia Brava; a linha de costa avançou aproximadamente 25 m em direção ao mar até 1969, quando a maior ocupação da orla aconteceu (Bessa, 2003).

Entretanto, em 1980, uma retração máxima de 24 m foi observada e a costa foi então considerada estável até 1997 (Bessa, 2003). Porém, os esforços para conter artificialmente a erosão estabeleceram uma linha de costa distinta, impedindo a praia de assumir sua configuração natural e esta costa não pode então ser considerada estável. Não há evidência de nenhum processo erosivo nas partes da praia que não sofreram nenhum tipo de intervenção, sendo que estas apresentam um balanço natural de sedimentos (Angulo, 1996).

Atualmente, os sistemas de gabião podem ser vistos ao longo da praia, na maioria das vezes deteriorado devido à corrosão das malhas (Figura 6 - direita). Além disso, muitas alternativas de contenção da erosão são utilizadas pelos moradores locais numa tentativa de proteger suas propriedades. Todo o ano são colocadas rochas, solo, gramados e até muros privativos podem ser vistos em frente às casas (Sampaio, 2006).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa utilizou armadilhas portáteis instaladas na zona de surfe para coletar sedimento transportado em suspensão pela corrente longitudinal (Kraus, 1987). A metodologia aplicada para a coleta das amostras de sedimentos em suspensão utilizada neste trabalho foi baseada nas adaptações feitas por Fontoura (2004) sobre as aplicações originais de Kraus (1987) e Wang *et al.*, (1998a).

Foram realizados quatro levantamentos de campo no litoral do Paraná, nos balneários Atami, Caravelas e Praia Brava, onde foram obtidos um total de 12 perfis verticais de concentração de sedimento em suspensão (72 amostras), e 12 amostras de sedimento do leito marinho.

Durante cada levantamento de campo foram medidos: perfis topográficos transversais entre a base das dunas e a linha de arrebentação; ângulo de aproximação, altura e período das ondas; além da direção e velocidade da corrente longitudinal conforme descrito a seguir. A análise granulométrica do sedimento coletado nas armadilhas foi realizada no Laboratório de Estudos Sedimentológicos e Petrologia Sedimentar (LabSed) da Universidade Federal do Paraná.

4.1 ARMADILHAS DE SEDIMENTO

Segundo Kraus (1987) as principais vantagens oferecidas pelas armadilhas são: a) medições de valor absoluto, com os sedimentos sendo capturados, pesados e analisados; b) taxas de transporte estabelecidas para intervalos de minutos, podendo ser diretamente relacionadas às ondas e correntes responsáveis pelo seu movimento; c) medição da distribuição vertical da taxa de transporte; d) uso simultâneo em diferentes pontos do perfil praial estudado; e) baixo custo, fácil construção e manutenção simples além de serem rústicos podendo ser utilizados em ambientes com grande ação de ondas; f) permitem elevado número de medições, principalmente quando comparado com métodos acumulativos e traçadores.

As principais desvantagens seriam: a) erosão do fundo nas proximidades da armadilha, produzindo alterações artificiais no fluxo de sedimentos b) alteração na velocidade local do fluxo pela interferência física do equipamento alterando as taxas de transporte medidas; c) necessidade de um tempo de coleta muito pequeno (5 a 10 minutos) que pode comprometer a representatividade da amostra; d) não pode ser utilizada durante a ocorrência de eventos extremos e esta limitação acarreta perda significativa de informação, já que as principais taxas de transporte ocorrem exatamente durante as tempestades (Kraus, 1987). Além disso, o emprego das armadilhas possui uma limitação em relação à profundidade em que estas podem ser fixadas, o que dependerá basicamente da altura e habilidade de quem está dando suporte, bem como das condições de ondas e correntes.

A armadilha é composta por um suporte metálico de 1,80 m (Figura 7) e por uma série de seis armações menores onde estão presas as redes de nylon de 63 μ m de abertura (Figura 8). Essas redes possibilitam a retenção das partículas do tamanho de grão areia. A abertura da malha coincide com o limite inferior do tamanho dos sedimentos não coesivos (areia muito fina).



Figura 7: Estrutura utilizada na coleta de sedimentos, com suas dimensões e a numeração utilizada em cada uma das 6 redes.

As armações onde estão presas as redes são numeradas de 1 a 6, começando do fundo até a superfície da coluna de água. As redes possuem comprimento de 60 cm e sua extremidade é dobrada duas vezes e fechada com elástico de borracha. As entradas de cada armação ficam presas à estrutura 4 cm afastadas das pernas laterais (Figura 8). Cada rede tem um comprimento mínimo que permite sua fixação na zona de surfe sem perda de eficiência. Se o comprimento fosse maior a ação das ondas e correntes dificultaria o manuseio, provocando interferência no fluxo.



Figura 8: Detalhe da armação utilizada, com o tamanho de malha, as dimensões de cada armação e a distância entre cada uma.

Em cada campanha para coleta de amostras as estruturas foram colocadas em 2 pontos transversalmente à zona de surfe, escolhidos de acordo com a topografia dos perfis praias obtidos, ficando submersas por um período de 5 a 10 minutos. Um tempo de coleta prolongado aumentaria a erosão do fundo nas proximidades da armadilha inferior, produzindo alterações artificiais no fluxo de sedimentos junto ao fundo. As operações restringem-se às profundidades em que uma pessoa consiga se manter estável para suportar a estrutura. Após cada coleta, a armadilha é retirada da água com o máximo cuidado a fim de preservar o sedimento retido e cada rede é removida e marcada com sua numeração, para posterior análise em laboratório.

4.2 SEDIMENTOS DO FUNDO

Sedimentos que compunham a camada superficial do fundo arenoso foram obtidos com recipientes de plástico no mesmo momento e nos mesmos locais onde as armadilhas foram colocadas. Isso permitiu relacionar as variações entre o material transportado em suspensão nas diferentes profundidades e o sedimento do fundo e estes dados são fundamentais para o ajuste de equações do transporte.

4.3 PERFIS DE PRAIA

Os levantamentos de campo se iniciam com a medição do perfil topográfico da praia, o qual auxilia na determinação dos melhores pontos onde serão colocadas as armadilhas (em função da existência de bancos e cavas) e também auxilia na identificação da profundidade e declividade da praia. Estes perfis foram medidos através de nivelamento e tiveram início a partir de um mesmo ponto de referência até as profundidades máximas possíveis em que a pessoa segurando a régua conseguia atingir com segurança.

4.4 DIREÇÃO E VELOCIDADE DA CORRENTE LONGITUDINAL

Os valores médios das correntes litorâneas geradas por ondas foram estimados usando-se derivadores (Figura 9), cronômetro e trena. Foram usadas estacas para marcar 30 m ao longo da linha de costa e a velocidade da corrente foi medida em função do tempo que os derivadores demoravam em percorrer os 30 m. As medições de velocidade da corrente foram realizadas nos locais dentro da zona de surfe onde foram empregadas as armadilhas. As medidas foram feitas em triplicata e foi utilizada a média dos valores obtidos.



Figura 9: Derivadores usados para medir as correntes longitudinais.

4.5 DIREÇÃO, ALTURA E PERÍODO DAS ONDAS

As medições de altura da onda (H_b) na zona de surfe foram feitas visualmente segurando-se uma régua na linha de arrebentação e registrando-se a altura de aproximadamente 30 ondas (observadas através da lente do nível), no início do experimento e no final. Os valores médios do período da onda (T) foram estimados através do intervalo de tempo em que 30 ondas passam por uma baliza fixa na zona de surfe. O ângulo de incidência das ondas (α) foi medido utilizando-se uma bússola alinhada à crista das ondas incidentes e comparando-o com a orientação da linha de costa.

4.6 GRANULOMETRIA

As amostras de sedimentos coletadas pelas armadilhas foram processadas em laboratório passando primeiramente pela lavagem para remoção dos sais e secagem em estufa com temperatura abaixo de 80° C. Posteriormente, foi realizada a pesagem do material seco total para determinação dos perfis verticais com a quantidade de sedimento transportado.

A distribuição granulométrica foi determinada pelo método de peneiramento utilizando-se cerca de 70 gramas de cada amostra. Para separação aleatória das amostras foi utilizado um quarteador, e o peneiramento foi feito utilizando-se um intervalo entre peneiras de $\frac{1}{2} \phi$, na escala de Wentworth (1922). Os parâmetros estatísticos foram calculados com os resultados da granulometria, segundo Folk & Ward (1957), através do programa Sysgran versão 3.0, desenvolvido por Maurício Garcia de Camargo, do Centro de Estudos do Mar da Universidade Federal do Paraná (CEM-UFPR).

4.7 PERFIS DE CONCENTRAÇÃO (C-PROFILES)

Considerando que os dados de transporte de sedimentos são uma medição integrada do fluxo a uma dada profundidade acima do fundo, $M(z)$, a determinação dos perfis de concentração requer conhecimento sobre o perfil vertical da velocidade da corrente longitudinal. Na ausência de um perfil medido, é necessário assumir que na profundidade h , entre o intervalo $0h < z < 0,5h$, (iniciando no fundo “0h”) o perfil vertical da corrente apresenta uma forma logarítmica (Wang *et al.*, 2002) definida como:

$$U_L(z) = \frac{U_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_o} \right) \quad (1)$$

onde $U_L(z)$ é a velocidade da corrente medida a uma altura z acima do fundo, U_* é a velocidade de fricção no fundo, κ é a constante de Von Kármán ($\cong 0,4$) e z_o é a rugosidade total. U_* é definida a partir da tensão de cisalhamento τ_0 como

onde ρ é a densidade do fluido (1023 kg/m^3 para a água do mar e salinidade de 35), e o coeficiente de arrasto, C_d , é dado por:

$$Cd = \left[\frac{\kappa}{1 + \ln(z_0/h)} \right]^2. \quad (2)$$

Para $z > 0,5h$ assume-se que $U_L(z)$ é constante com a profundidade até a superfície. Este tipo de perfil vertical de velocidade é uma aproximação razoável, de acordo com perfis de corrente medidos em laboratório (Wang *et al.*, 2002) e medições de campo (Garcez Faria *et al.*, 1998). A concentração de sedimentos em suspensão em g/L, C , é então calculada para cada altura onde foram coletadas amostras de sedimentos, usando a equação:

$$C_{(z)} = \frac{M_{(z)}}{U_{L(z)} \times A \times L \times t} \quad (3)$$

onde $M(z)$ é a profundidade, $U_L(z)$ é a velocidade da corrente, A e L são as dimensões da armadilha (altura = 0,15 m e largura = 0,09 m, respectivamente); e t é o tempo em que cada armadilha permaneceu submersa.

4.7.1 Sedimentos

As propriedades físicas e dinâmicas dos sedimentos; expressas como velocidade de decantação das partículas e tensão de cisalhamento; determinam a resposta dos sedimentos para as forças hidrodinâmicas e são parâmetros fundamentais que governam o comportamento de acordo com o modo de transporte das partículas. Neste estudo, a tensão de cisalhamento é dada por $\tau = \rho U_*^2$, onde o parâmetro de Shields, θ_{crit} , é definido pelo parâmetro de tamanho de grão adimensional D_* , então:

$$(4)$$

$$e \quad D_* = \left[\frac{g(s-1)}{\nu^2} \right]^{1/3} D_{50} \quad (5)$$

(Soulsby, 1997). Onde s é a razão da densidade do grão e do fluido (ρ_s/ρ) e ν é a viscosidade cinemática da água. São usados: $g = 9,81 \text{ m}^2/\text{s}$, ρ_s para grãos de quartzo = 2650 kg/m^3 e $\nu = 1,36 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Estimativas da velocidade de decantação das partículas foram calculadas através da fórmula:

$$w_s = \frac{\nu}{D_{50s}} \left[(10,36^2 + 1,049 D_{*s}^3)^{1/2} - 10,36 \right] \quad (6)$$

(Soulsby, 1997), onde D_{50s} é o diâmetro do grão medido das amostras coletadas pelas redes e D_{*s} são os valores D_* para aquele sedimento. A velocidade crítica da tensão de cisalhamento é dada por U_{crit} e para $D_* > 0,1$ é definida por Soulsby (1992):

$$U_{crit} = 7 \left(\frac{h}{D_{50}} \right)^{1/7} [g(s-1)D_{50}\theta_{crit}]^{1/2} \quad (7)$$

4.7.2 Rugosidade do fundo

Na zona de surfe, onde pode haver formas de leito e transporte ativo de sedimentos, a rugosidade de fundo total, z_0 , possui três componentes: rugosidade causada pelos sedimentos que compõe o fundo, z_{0G} , definida como $D_{50}/12$ (Soulsby, 1997); rugosidade causada pelas formas de leito, z_{0R} ; e rugosidade causada pelo transporte de partículas, z_{0Q} . z_{0R} pode ser definida como:

(8)

(Soulsby, 1997), onde Θ é um parâmetro escalar entre os intervalos de 0,3 a 3,0 e λ e η são os comprimentos e alturas das formas de leito (ripples), respectivamente. Uma equação amplamente usada para calcular z_{0Q} , que não requer conhecimentos sobre z_0 é $z_{0Q} = 0,00533U_w^{2,25}$, onde U_w é a velocidade orbital das ondas. Então, por Soulsby (1997):

$$z_o = z_{0G} + z_{0R} + z_{0Q} = \frac{D_{50}}{12} + \Theta \frac{\eta^2}{\lambda} + 0,00533U_w^{2,25} . \quad (9)$$

4.7.3 Ondas

Usando a distribuição apropriada de alturas de ondas $H(x)$, estimativas de $U_w(x)$, foram obtidas utilizando a teoria do fluxo de ondas de Dean¹. Estimativas da tensão de cisalhamento induzida por ondas, $\hat{\tau}_{ws}(x)$, foram então obtidas usando $\hat{\tau}_{ws} = 0,5f_w U_w^2$, onde o fator de fricção de onda, f_w , é definido a partir da rugosidade relativa, r , por Swart (1974) como $f_w = 0,3$ para $r \leq 1,57$ e $f_w = 0,00251 \exp(5,21r^{-0,19})$ para $r > 1,57$. Swart (1974) considera $r = A_o/k_s$ onde A_o é a amplitude orbital das ondas ($U_w T / 2\pi$). Para condições de leito de fundo plano, a rugosidade de fundo é dada pela rugosidade equivalente das partículas, $k_s = 2,5D_{50}$. Entretanto, em casos onde as formas de leito estão presentes, e os sedimentos são transportados por arraste, k_s é definido pela rugosidade total z_0 , consequentemente $k_s = 30z_0$.

¹ Rotinas do Matlab foram obtidas: <http://faculty.gg.uwo.edu/DSF..>

4.7.4 Interações ondas + correntes e perfis de concentração.

Para estimar o total de sedimentos transportados pelas correntes longitudinais é essencial modelar perfis de concentração para todas as porções da zona de surfe. Nesta zona, onde as velocidades das correntes longitudinais podem exceder 0,5 m/s, não está ainda definido se os perfis de concentração são controlados pela ação das ondas, das correntes ou por uma combinação destas duas forçantes. O modelo proposto por Williams *et al.* (1999a,b) considera ondas e correntes em conjunto, e é definido por:

$$\bar{C}(z) = \bar{C}(a) \left(\frac{z + L\alpha_{wc}}{a + L\alpha_{wc}} \right)^{-\alpha_{wc}} \quad (10)$$

onde $\bar{C}(a)$ é um valor de referência \bar{C} a uma profundidade a , L é uma escala vertical de parametrização para o fluxo oscilatório para fundos com formas de leito e α_{wc} é o parâmetro Rouse para ondas = $w_s / \kappa (U_{*mean} + U_{*max})$. Estimativas de $\bar{C}(a)$ são obtidas usando:

$$\bar{C}(a) = \rho_s \left[\frac{0,331(\theta_s - 0,045)^{1,75}}{1 + 0,720(\theta_s - 0,045)^{1,75}} \right] \quad (11)$$

onde θ_s é o parâmetro de Shields (Zyserman & Fredsoe, 1994). Seguindo conceitos de Nielsen (1992), L é definido pela altura da forma de leito (ripple), η , e velocidade de decantação da partícula w_s , como:

$$(12)$$

e

$$(13)$$

4.8 TAXA DE TRANSPORTE LONGITUDINAL Q_{LS}

Muitas fórmulas têm sido desenvolvidas usando medições de campo e dados de laboratório. Todas fazem concepções simples sobre a hidrodinâmica e sobre os processos sedimentares, e não consideram fatores como topografia (barras e canais) ou o transporte de sedimentos transversal à costa (Williams *et al.*, 2007).

A taxa de transporte longitudinal Q_{LS} mede a deriva litorânea através de um plano normal à linha de costa. Variações na Q_{LS} ao longo da costa indicam avanço ou retração da linha de costa, especialmente se alguma obstrução, como um espigão ou porção rochosa, provoca acréscimo de sedimentos a barlar e erosão a sotamar (Soulsby, 1997).

A fórmula proposta por Bayram *et al.* (2007) é baseada em um coeficiente de transporte, expresso pela difusidade do sedimento (ϵ), na forma da expressão:

$$Q_{LS} = \frac{\epsilon}{(\rho_s - \rho)(1 - \rho)g w_s} \overline{F U_L} \quad (14)$$

onde ρ_s é a densidade do sedimento, ρ é a densidade da água, w_s é a velocidade de decantação da partícula, F é o fluxo de energia de onda em direção à costa e U_L é a velocidade média da corrente longitudinal na zona de surfe.

5 RESULTADOS

Dentre os quatro levantamentos de campo realizados no litoral do Paraná, dois foram feitos em julho e agosto de 2007 e os outros dois em fevereiro e março de 2008. Com o propósito de determinar como as diferentes condições hidrodinâmicas afetam o transporte de sedimentos pela deriva litorânea, essas duas diferentes etapas de coleta representam condições de inverno e verão, respectivamente. Os resultados são apresentados em ordem cronológica, e devidamente separados por cada levantamento.

Os dados referentes às condições hidrodinâmicas são apresentados de acordo com o nome da praia onde foram realizadas as coletas; data; tempo de permanência da armadilha na zona de surfe (t); velocidade da corrente longitudinal (U_L); altura de onda (H_b); período de onda (T); ângulo de aproximação das ondas em relação à costa (α) e direção da corrente longitudinal (norte e sul).

Os resultados dos perfis de praia mostram a topografia desde um ponto de referência até a zona de surfe, onde a extensão do perfil está indicada no eixo x e as variações na altura indicadas no eixo y . Em cada perfil estão marcadas as posições onde a armadilha permaneceu durante as coletas, diferenciadas entre as três praias estudadas: Atami (A), Caravelas (C) e Praia Brava (PB). No total foram obtidos 12 perfis de praia, e as armadilhas foram colocadas em 2 pontos de cada um dos perfis. A escolha dos pontos foi determinada pela possibilidade de avanço na arrebentação e existência de bancos ou cavas; observados durante o levantamento topográfico.

Os gráficos contendo as concentrações do material particulado em suspensão foram calculados usando os dados do transporte longitudinal (peso total retido para cada profundidade). Também foram estimadas curvas de concentração baseadas apenas nos dados hidrodinâmicos (modelo descrito nos métodos). A nomenclatura para cada ponto de coleta segue o mesmo padrão da localização no perfil (A1, A2, C1, C2).

A granulometria está expressa por meio do diâmetro médio da partícula D_{50} , e sua distribuição de acordo com a profundidade. Um ajuste é apresentado para cada conjunto de dados, mostrando o valor de r^2 , o qual indica se há ou não correlação entre os dados. Esse ajuste permite visualizar melhor as variações no

tamanho de grão dos sedimentos transportados. A distribuição granulométrica de todas as amostras analisadas está é representada nos Apêndices 1, 2, 3 e 4.

5.1 PRIMEIRA COLETA – 26 DE JULHO DE 2007

Os dados desta coleta foram obtidos entre 10:00 e 14:00 horas, um dia após a passagem de um sistema frontal, portanto as condições de mar estavam bastante agitadas. O ângulo de aproximação das ondas estava entre 3 e 5 graus, o que é representativo apenas das condições na zona de surfe, sem considerar a ondulação em mar aberto (Tabela 1). A maior altura de onda foi observada na parte central (Caravelas) com 0,8 m, e a menor altura na Praia Brava de Matinhos (0,4 m). O período, entretanto, não variou significativamente entre os três locais (Tabela 1). As correntes longitudinais medidas estavam seguindo em direção ao norte nas três ocasiões, sendo que os maiores valores foram encontrados para Caravelas (1,46 m/s).

Tabela 1: Condições hidrodinâmicas predominantes durante a coleta do dia 26/07/2007.

Coleta	Hora	t (min)	U_L (m/s)	Hb (m)	T (s)	α (graus)	Direção
Atami	10:00	10	0,22	0,65	9	5	N
Caravelas	12:00	6	1,46	0,80	10	5	N
Praia Brava	14:00	5	0,76	0,40	9	3	N

5.1.1 Atami

O perfil praial do Atami é bastante extenso e com uma declividade relativamente suave (Figura 10). A localização de cada estrutura está indicada por

A1 e A2, representando a coleta mais próxima à linha de costa e a mais afastada, respectivamente. A distância entre os dois pontos é de aproximadamente 20 m.

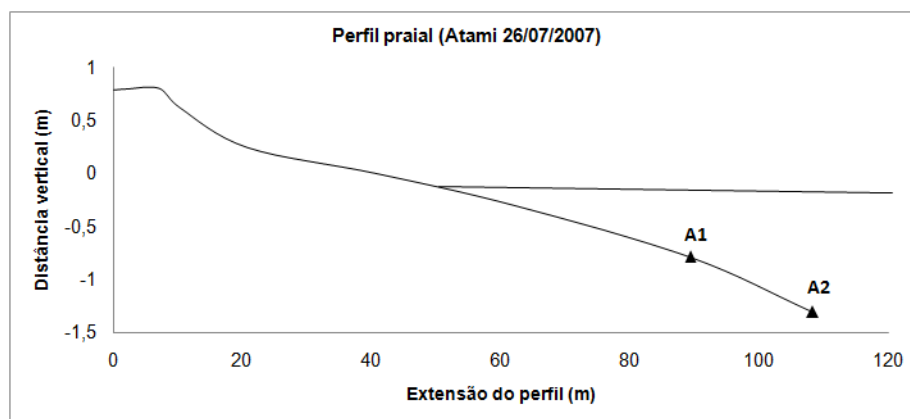


Figura 10: Perfil praiado obtido durante a coleta do dia 26/07/2007 para o ponto Atami, mostrando a localização de cada armadilha (A1 e A2) e suas respectivas profundidades, relativas ao nível do mar no momento das medições.

As concentrações de sedimento coletadas estão ilustradas na figura 11, onde considerando o tempo de permanência da estrutura de 10 minutos (Tabela 1), são observadas concentrações na escala de 0,018 - 0,064 g/L para o ponto A1 e 0,008 - 0,092 g/L para o ponto A2 (Figura 11).

Os dois perfis não apresentam a clássica diminuição na quantidade de sedimento de acordo com a diminuição da profundidade e desenvolvem uma forma bastante diferente. É possível observar que a estrutura mais próxima da costa (A1), de acordo com o perfil (Figura 11) é a que possui uma distribuição mais homogênea. A estrutura A2 por outro lado apresenta a maior quantidade de sedimento próximo ao fundo e depois apenas na superfície. O modelo de concentração expresso no gráfico da Figura 11 não apresentou um bom ajuste aos dados das armadilhas. Nos dois casos houve superestimação de até duas ordens de magnitude (Figura 11).

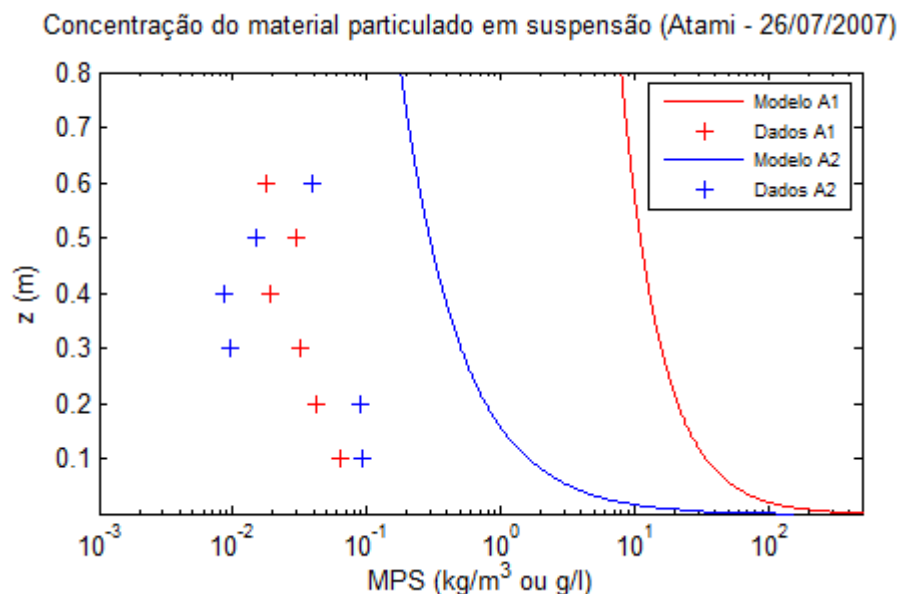


Figura 11: Perfis verticais de concentração de sedimentos, MPS (g/L ou Kg/m^3) transportado pela corrente longitudinal de acordo com a altura na coluna d'água (z) para um período de 10 minutos no perfil Atami (26/07/2007).

A distribuição dos valores de D_{50} de acordo com a profundidade pode ser visualizada na figura 12. Os valores variaram entre 0,11 e 0,12 mm no ponto A1 e entre 0,10 e 0,16 mm no ponto A2. As curvas de ajuste mostram decréscimo no tamanho de D_{50} de acordo com a profundidade, onde os maiores valores são encontrados próximo ao fundo (Figura 12).

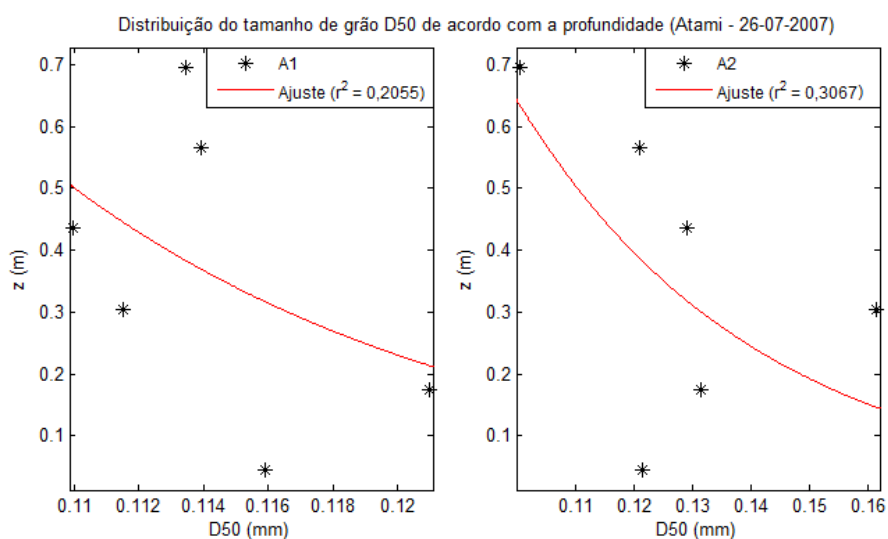


Figura 12: Distribuição do diâmetro médio das partículas (D_{50}) de acordo com a altura da coluna de água (z), para os pontos A1 e A2.

5.1.2 Caravelas

O perfil da praia no balneário Caravelas possui declividade mais acentuada e mostra claramente a presença de um campo de dunas, não havendo uma boa definição da berma (Figura 13). Considerando a parte emersa da praia, vemos que o perfil submerso possui uma declividade mais suave, por pelo menos 40 m, até onde as coletas foram feitas.

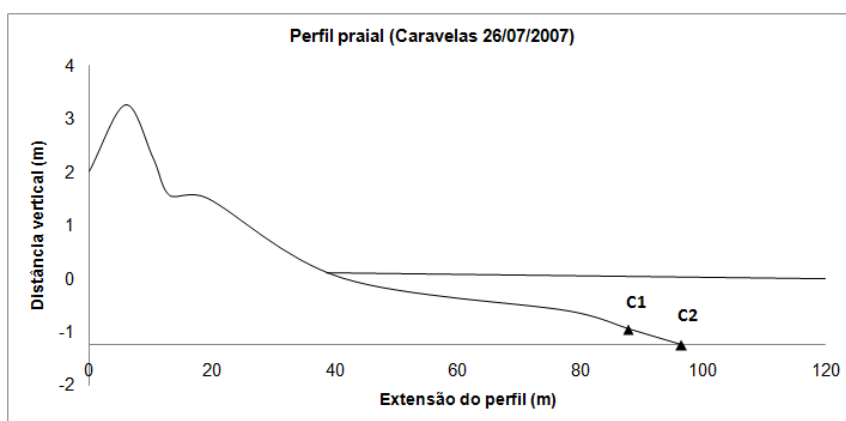


Figura 13: Perfil praiado obtido durante a coleta do dia 26/07/2007 para o ponto Caravelas, mostrando a localização de cada armadilha (C1 e C2) e suas respectivas profundidades, relativas ao nível do mar no momento das medições.

Nos perfis de concentração para a praia de Caravelas, foram encontradas concentrações de sedimento com valores máximos e mínimos de 0,076 - 1,042 g/L para o ponto C1 e 0,047 - 0,752 g/L para o ponto C2. Com um tempo de permanência submersas de 6 minutos (Tabela 1). As duas estruturas, C1 e C2 apresentaram curvas de concentração bastante similares, e com a clássica diminuição da concentração de acordo com a profundidade. A única diferença entre as curvas tem relação com sua localização no perfil praiado (Figura 14). Neste caso, a maior concentração é observada nas três primeiras amostras próximas ao fundo, da estrutura C1, que está na parte mais rasa (Figura 13). As curvas do modelo de concentração mostraram um ajuste razoável na forma, porém os dados foram superestimados em uma ordem de magnitude.

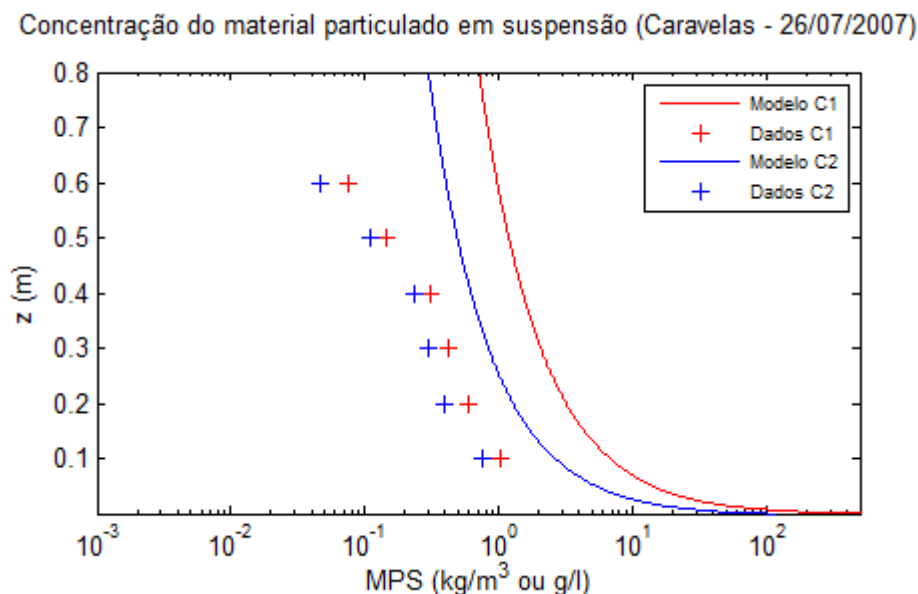


Figura 14: Perfis verticais de concentração de sedimentos, MPS (g/L ou Kg/m^3) transportado pela corrente longitudinal de acordo com a altura na coluna d'água para um período de 6 minutos no perfil Caravelas (26/07/2007).

A variação do tamanho médio D_{50} foi de 0,17 a 0,19 mm no ponto C1 e 0,19 a 0,23 mm no ponto C2. A distribuição se mostrou aleatória, considerando que os valores de r^2 são muito pequenos e não há nenhum padrão claro, apenas a existência dos menores valores de D_{50} próximo ao fundo, nos dois casos (Figura 15).

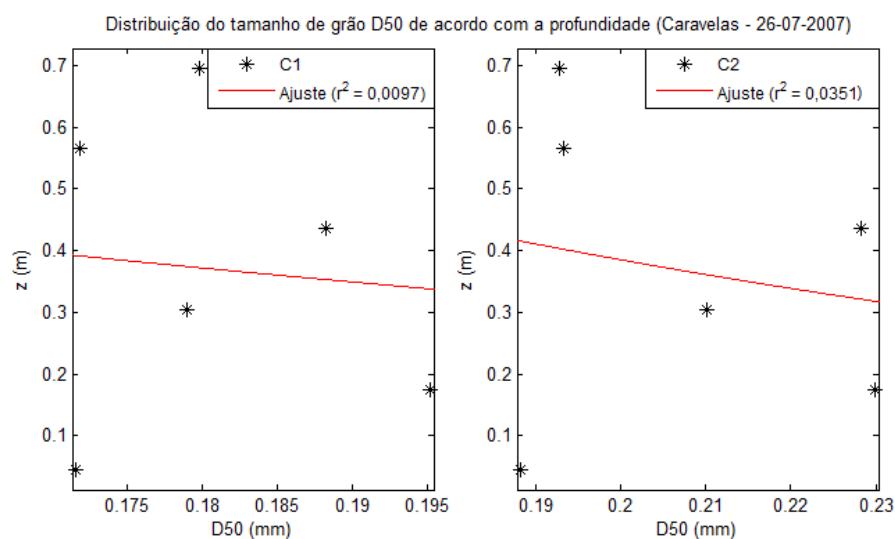


Figura 15: Distribuição do diâmetro médio das partículas (D_{50}) de acordo com a altura da coluna de água (z), para os pontos C1 e C2.

5.1.3 Praia Brava

A praia Brava como mencionado anteriormente é uma região bastante afetada por processos erosivos. Por este motivo, o perfil praiar representado na Figura 16 não representa campos de dunas, ou alguma estrutura rochosa, mas apresenta este perfil abrupto, pois está localizado exatamente onde há destruição da pavimentação e proteção por gabiões.

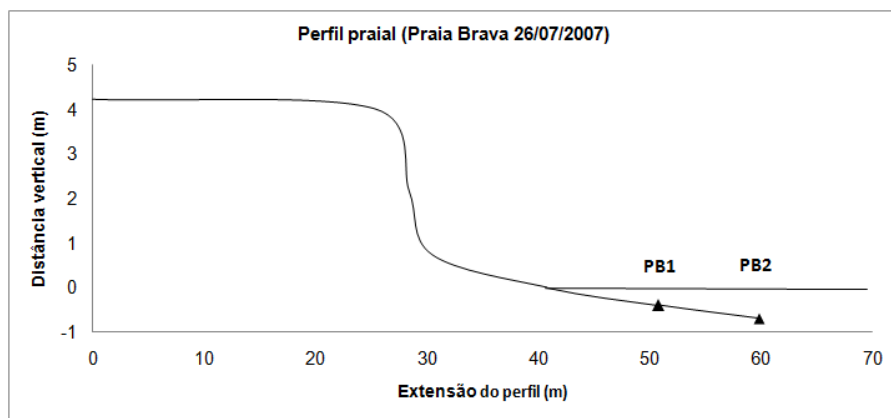


Figura 16: Perfil praiar obtido durante a coleta do dia 26/07/2007 para o ponto Praia Brava, mostrando a localização de cada armadilha (PB1 e PB2) e suas respectivas profundidades, relativas ao nível do mar no momento das medições.

As maiores concentrações representam a estrutura mais próxima da linha d'água (PB1), e os valores variaram entre 0,027 - 0,268 g/L para o ponto PB1 e 0,027 - 0,162 g/L para o ponto PB2. Existe uma certa similaridade nos dois perfis de concentração para a Praia Brava, na parte do meio da coluna d'água, onde parece haver homogeneidade (Figura 17). Os dados do modelo mostraram curvas de concentrações com resultados maiores do que as calculadas baseando-se no material em suspensão medido. Essas curvas apresentaram o mesmo padrão, apesar dos cálculos usados no modelo considerarem que há diferenças de profundidade e da velocidade da corrente entre os dois pontos.

Concentração do material particulado em suspensão (Praia Brava - 26/07/2007)

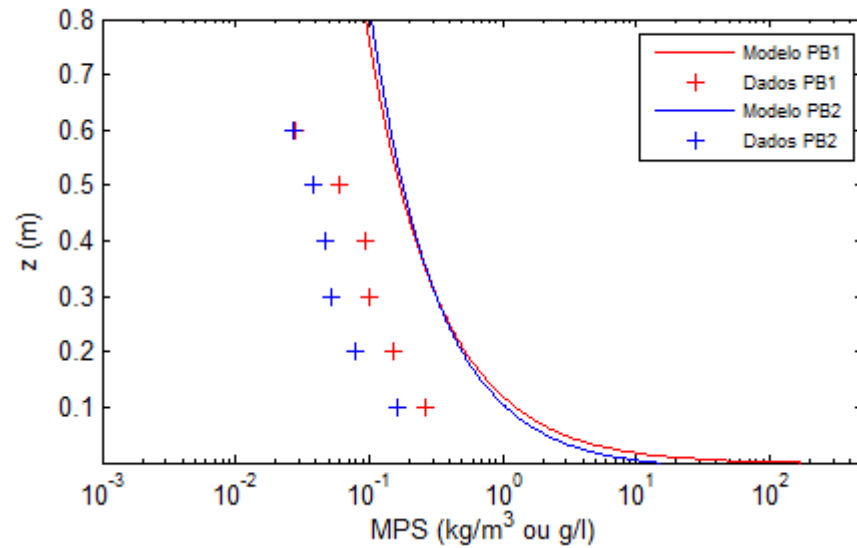


Figura 17: Perfis verticais de concentração de sedimentos, MPS (g/L ou Kg/m³) transportado pela corrente longitudinal de acordo com a altura na coluna d'água para um período de 5 minutos no perfil Praia Brava (26/07/2007)

Os valores de D_{50} de acordo com a profundidade, para a Praia Brava, são apresentados na figura 18. Os valores variaram entre 0,12 e 0,15 mm no ponto PB1 e entre 0,13 e 0,16 mm no ponto PB2. As curvas de ajuste mostram pouco decréscimo no tamanho de D_{50} de acordo com a profundidade (Figura 18)

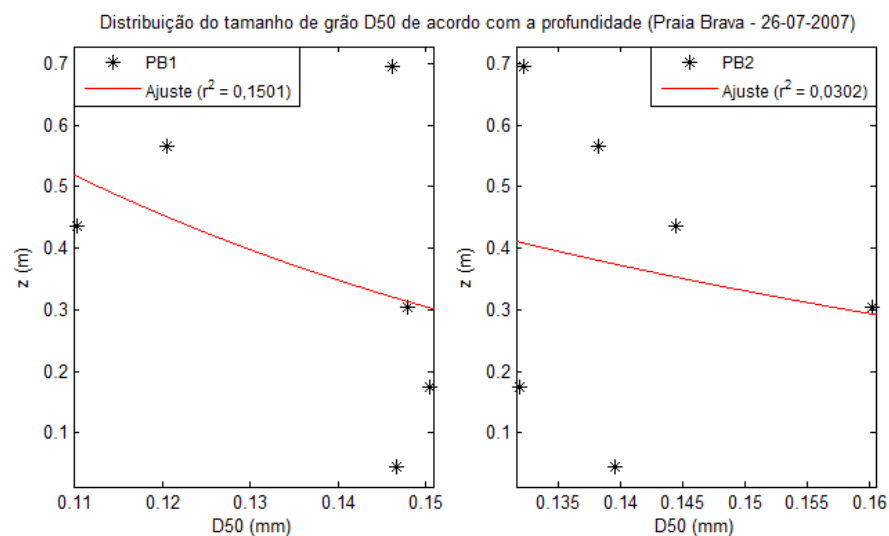


Figura 18: Distribuição do diâmetro médio das partículas (D_{50}) de acordo com a altura da coluna de água (z), para os pontos PB1 e PB2.

5.2 SEGUNDA COLETA – 26 DE AGOSTO DE 2007

Nos dias anteriores ao desta coleta, não foi possível realizar nenhum trabalho de campo, pois as condições estavam calmas, mesmo considerando o período do inverno. Ainda assim as medições puderam ser realizadas no dia 26, revelando condições bem diferentes das previamente apresentadas. O ângulo de aproximação de ondas no Atami estava nulo, sem definição nenhuma de corrente, porém em Caravelas e Praia Brava foram medidas correntes mais significativas, as ondas tinham grau de aproximação de 5 graus em relação à linha de costa e alturas de onda relativamente baixas (Tabela 2).

Tabela 2: Condições hidrodinâmicas predominantes durante a coleta do dia 26/08/2007.

Coleta	Hora	t (min)	U_L (m/s)	H (m)	T (s)	α (graus)	Direção
Atami	17:00	10	0,01	0,30	8	0	N
Caravelas	13:00	5	0,19	0,30	12	5	N
Praia Brava	10:00	5	0,47	0,40	10	5	N

5.2.1 Atami

O perfil praial no Atami está representado na Figura 19, com a localização onde foram colocadas as armadilhas nos pontos A3 e A4. Apesar dos efeitos do exagero vertical, a declividade do perfil é considerada suave e não foi observada a formação de bermas nem bancos longitudinais.

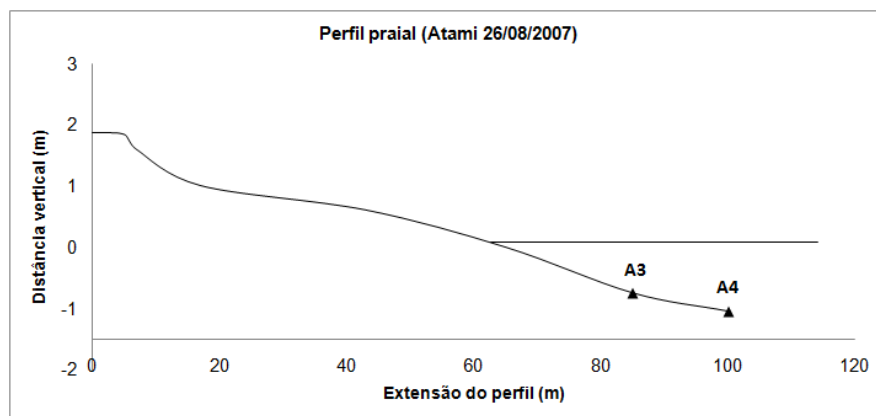


Figura 19: Perfil praiat obtido durante a coleta do dia 26/08/2007 para o ponto Atami, mostrando a localização de cada armadilha (A3 e A4) e suas respectivas profundidades, relativas ao nível do mar no momento das medições.

Os perfis de concentração de sedimento para o Atami mostram concentrações de material em suspensão entre 0,054 - 0,696 g/L no ponto A3 e entre 0,040 - 0,417 g/L no ponto A4. As curvas do modelo para o mesmo local tiveram bom ajuste para A3, porém a curva do modelo A4 apresenta um decréscimo a partir do fundo e os valores gerados são muito pequenos e a partir da profundidade 0,2 m, não aparecem no gráfico (Figura 20).

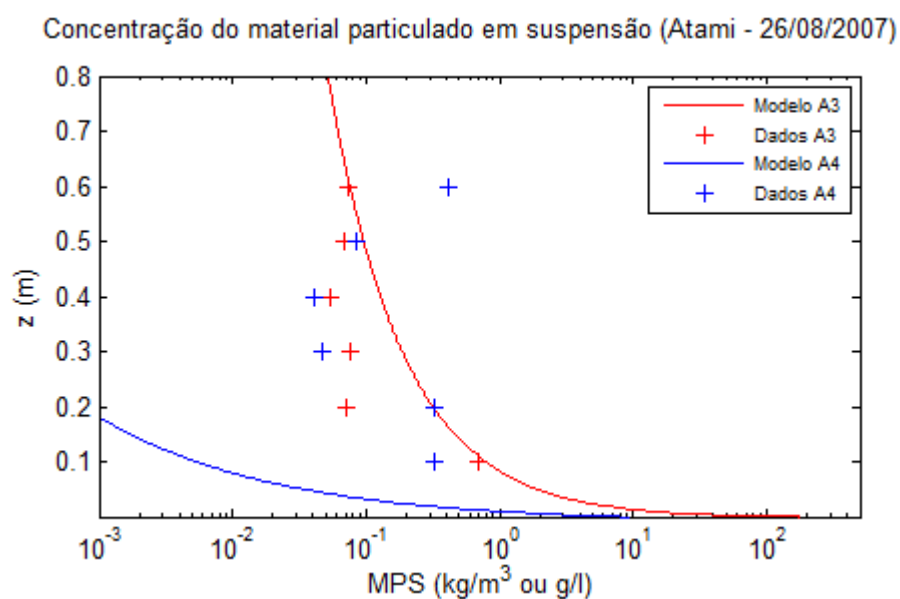


Figura 20: Perfis verticais de concentração de sedimentos, MPS (g/L ou Kg/m³) transportado pela corrente longitudinal de acordo com a altura na coluna d'água para um período de 10 minutos no perfil Atami (26/08/2007).

No Atami, os valores de D_{50} de acordo com a profundidade, estão apresentados na figura 21. Os valores variaram entre 0,09 e 0,19 mm no ponto A3 e entre 0,08 e 0,14 mm no ponto A4. As curvas de ajuste mostram decréscimo no tamanho de D_{50} de acordo com a profundidade em A3, porém o valor máximo de 0,19 mm, e o contrário é observado em A4, onde há aumento de D_{50} com a diminuição da profundidade (Figura 21).

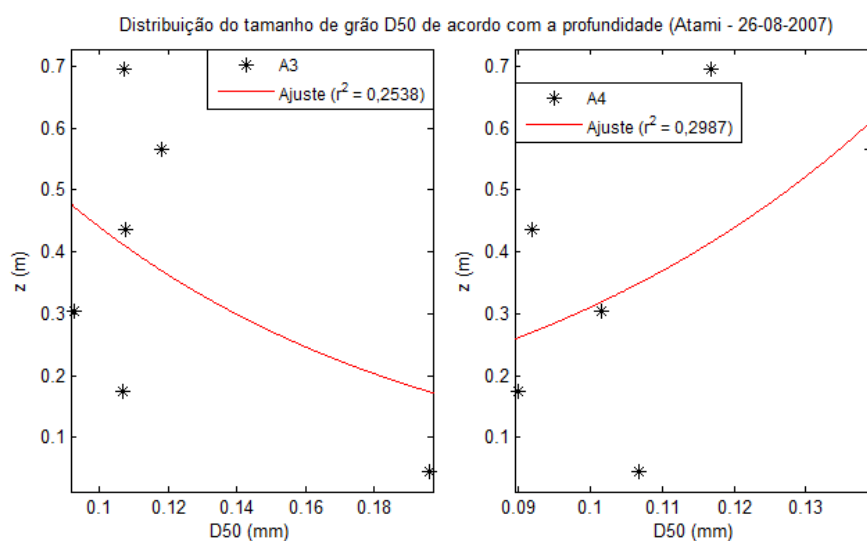


Figura 21: Distribuição do diâmetro médio das partículas (D_{50}) de acordo com a altura da coluna de água (z), para os pontos A3 e A4.

5.2.2 Caravelas

No perfil praiar Caravelas, os dois pontos de coleta estão próximos, pois a extensão da zona de surfe é relativamente curta, em torno de 40 m. As estruturas C3 e C4 foram posicionadas com um intervalo de 5 m (Figura 22).

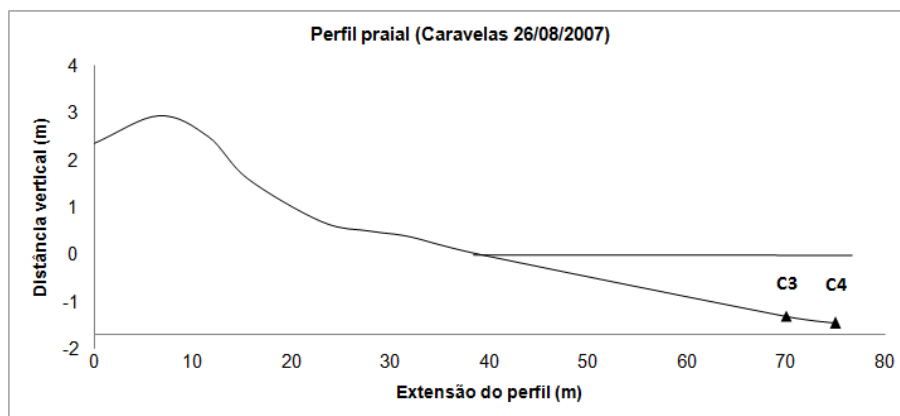


Figura 22: Perfil praiar obtido durante a coleta do dia 26/08/2007 para o ponto Caravelas, mostrando a localização de cada armadilha (C3 e C4) e suas respectivas profundidades, relativas ao nível do mar no momento das medições.

Para o balneário Caravelas, as maiores concentrações estão, necessariamente, próximas ao fundo na estrutura C3 (Figura 23). O inverso ocorre com a estrutura C4, que apresenta maiores concentrações nas profundidades entre 0,3 e 0,4 m. As concentrações variaram entre 0,043 - 0,382 g/L em C3 e 0,091 - 0,251 g/L em C4. O modelo claramente subestimou as concentrações, considerando as condições hidrodinâmicas presentes na hora da coleta (Figura 23).

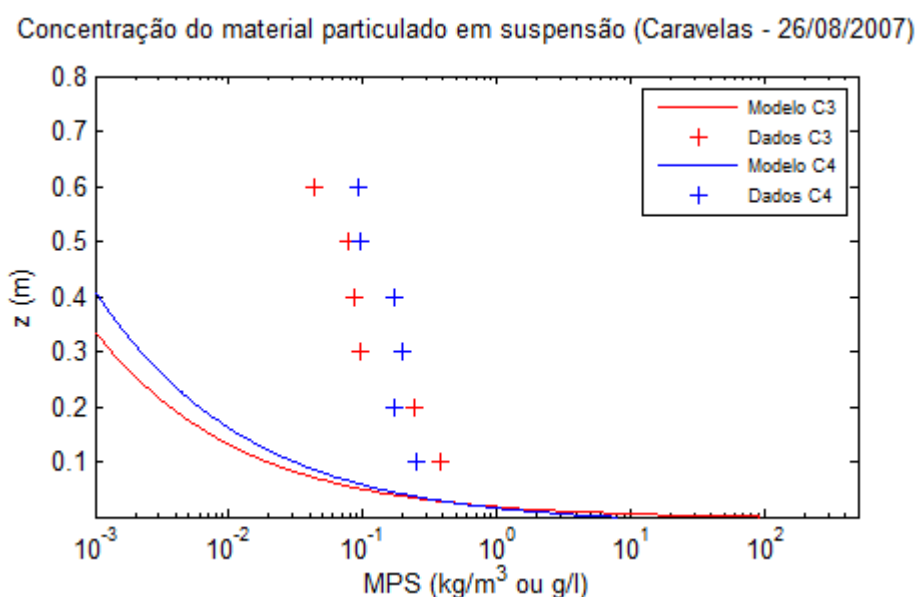


Figura 23: Perfis verticais de concentração de sedimentos, MPS (g/L ou Kg/m³) transportado pela corrente longitudinal de acordo com a altura na coluna d'água para um período de 5 minutos no perfil Caravelas (26/08/2007).

A variação do tamanho de grão D_{50} para o ponto Caravelas pode ser visualizada na figura 24, onde os valores encontrados ficam entre 0,14 e 0,16 mm no ponto C3 e entre 0,14 e 0,21 mm no ponto C4. As curvas de ajuste mostram um pequeno decréscimo no tamanho de D_{50} nos dois casos, porém é mais clara no ponto C3.

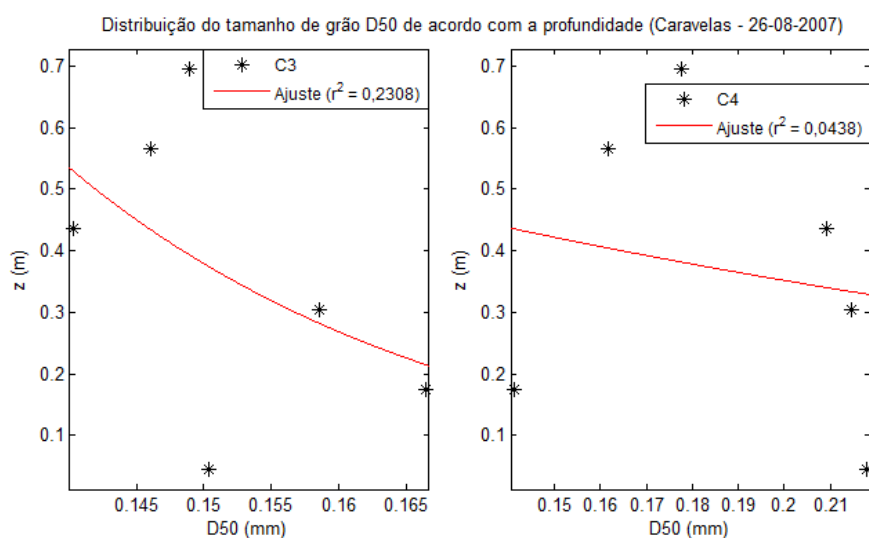


Figura 24: Distribuição do diâmetro médio das partículas (D_{50}) de acordo com a altura da coluna de água (z), para os pontos C3 e C4.

5.2.3 Praia Brava

Na praia Brava as duas estruturas foram colocadas em pontos muito próximos (Figura 25), pois a extensão da zona de surfe era de aproximadamente 20 m e as condições de amostragem mais difíceis devido à velocidade das correntes no momento da coleta (Tabela 2).

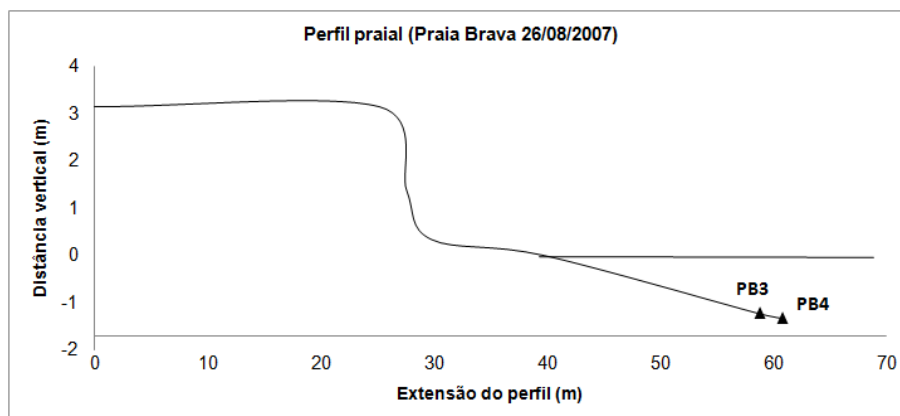


Figura 25: Perfil praiat obtido durante a coleta do dia 26/08/2007 para o ponto Praia Brava, mostrando a localização de cada armadilha (PB3 e PB4) e suas respectivas profundidades, relativas ao nível do mar no momento das medições.

As concentrações medidas foram entre 0,013 - 0,181g/L no ponto PB3 e 0,021 - 0,100 g/L no ponto PB4 (Figura 26). Os dados apresentaram homogeneidade, sem grandes discrepâncias entre valores quanto à variação da profundidade. O modelo de concentração segue a tendência dos valores obtidos para PB3, com um aparente aumento, principalmente nos dados próximos ao fundo. Em relação ao ponto PB4 a curva mostrou valores muito menores a partir da profundidade 0,1 m até 0,4 m (Figura 26).

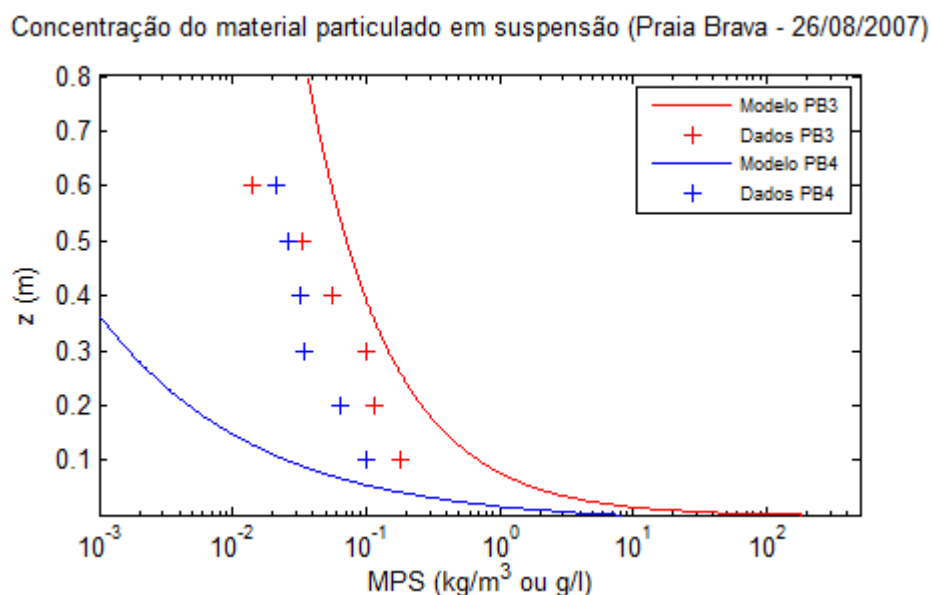


Figura 26: Perfis verticais de concentração de sedimentos, MPS (g/L ou Kg/m³) transportado pela corrente longitudinal de acordo com a altura na coluna d'água para um período de 5 minutos no perfil Praia Brava (26/08/2007).

A variação do diâmetro D_{50} para o ponto Praia Brava pode ser visualizada na Figura 27, onde os valores encontrados ficam entre 0,19 – 0,22 mm no ponto PB3 e entre 0,13 – 0,20 mm no ponto PB4. Houve decréscimo nos valores de D_{50} (maiores próximo ao fundo) com um bom ajuste tanto para PB3 como para PB4, e valores de r^2 em torno de 0,5.

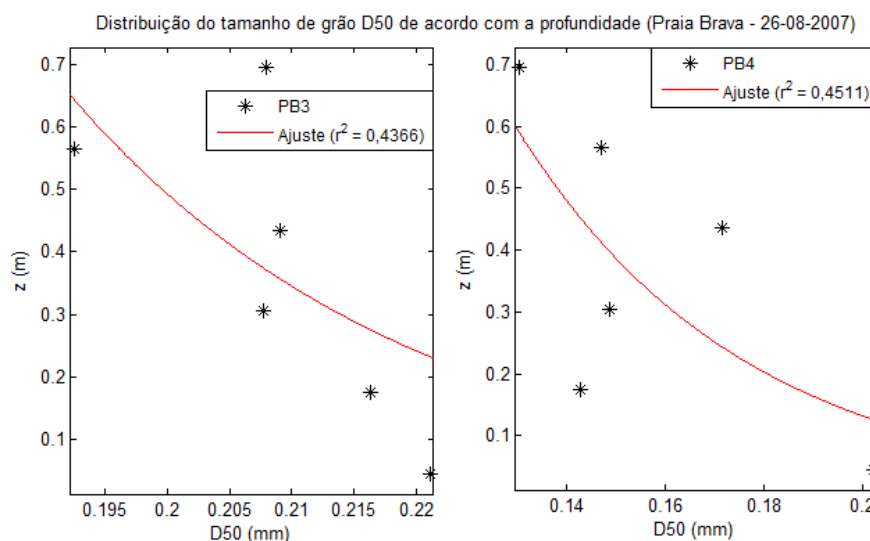


Figura 27: Distribuição do diâmetro médio das partículas (D_{50}) de acordo com a altura da coluna de água (z), para os pontos PB3 e PB4.

5.3 TERCEIRA COLETA – 27 DE FEVEREIRO DE 2008

Diferentemente das observações feitas nas duas coletas anteriores, esta se refere ao período do verão, onde as condições de ventos e ondas predominantes são diferentes, existindo maior atuação dos sistemas de NE. Portanto, temos os primeiros dados de um transporte para sul (Tabela 3). Durante o período entre 9:15 e 14:30 h os maiores ângulos de orientação do trem de ondas foram encontrados para o Atami e Caravelas, sendo que em matinhos havia uma aproximação mais paralela. As alturas de onda por outro lado estavam maiores na Praia Brava e Caravelas, com 1 m. Os períodos variaram em um segundo pra cada região, sendo que o menor foi 8 s na Praia Brava e o maior observado foi de 10 s em Caravelas

(Tabela 3). Mesmo com o ângulo menor de aproximação de ondas, a Praia Brava apresentou correntes mais velozes.

Tabela 3: Condições hidrodinâmicas predominantes durante a coleta do dia 27/02/2008.

Coleta	Hora	t (min)	U_L (m/s)	H (m)	T (s)	α (graus)	Direção
Atami	09:15	10	0,30	0,40	9	5	S
Caravelas	12:30	10	0,39	1,00	10	5	S
Praia Brava	14:30	10	0,71	1,00	8	3	S

5.3.1 Atami

O terceiro perfil obtido na praia do Atami apresenta um suave declive na face praial e uma extensa zona na parte emersa da praia. Os pontos de coleta foram próximos e estão representados na Figura 28 por A5 e A6.

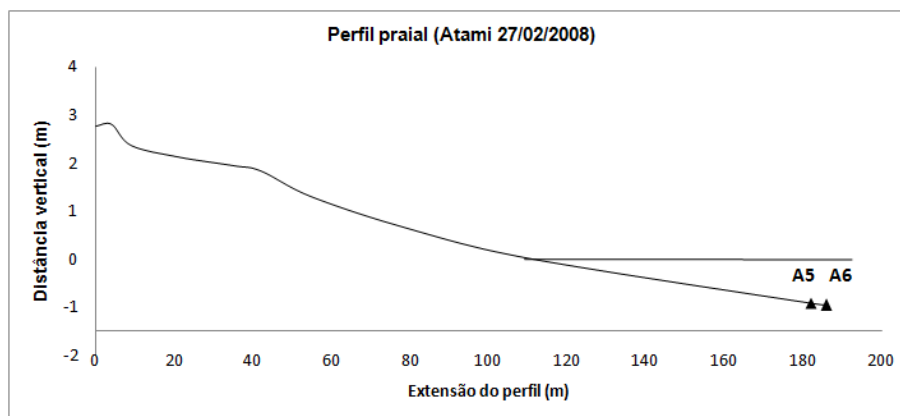


Figura 28: Perfil praial obtido durante a coleta do dia 27/02/2008 para o ponto Atami, mostrando a localização de cada armadilha (A5 e A6) e suas respectivas profundidades, relativas ao nível do mar no momento das medições.

A concentração de material particulado em suspensão transportado no Atami (Figura 29) responde a um perfil com diminuição crescente até a superfície e muito acentuada no fundo para o ponto A6, enquanto no ponto A5 os dados mostram um

decréscimo gradual. A diferença na concentração foi muito grande entre A5 e A6, variando entre 0,061 - 0,796 g/L e 0,006 - 0,212 g/L respectivamente. O modelo se adequou aos dados do ponto A6, porém os resultados foram superestimados em uma ordem de magnitude no ponto A5 (Figura 29).

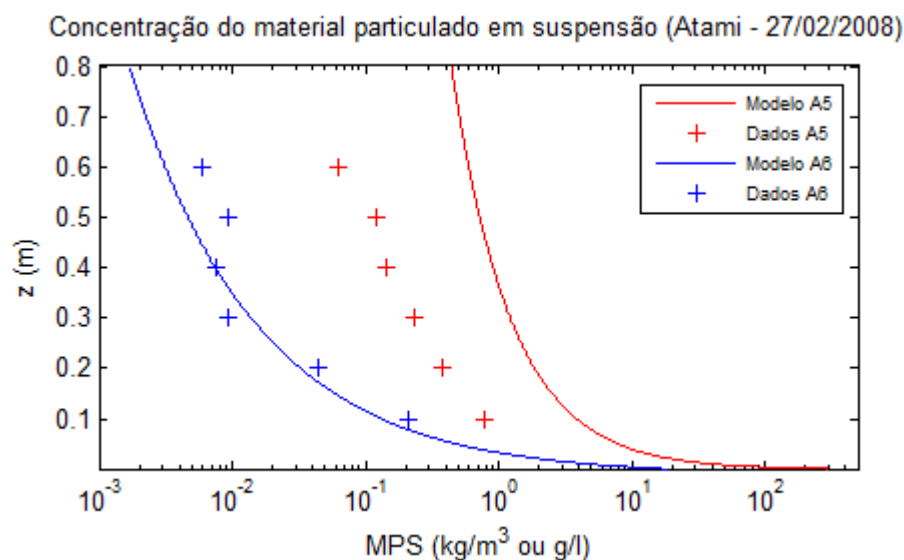


Figura 29: Perfis verticais de concentração de sedimentos, MPS (g/L ou Kg/m³) transportado pela corrente longitudinal de acordo com a altura na coluna d'água para um período de 10 minutos no perfil Atami (27/02/2008).

Com relação ao tamanho de grão no Atami, foram encontrados valores de D_{50} entre 0,10 a 0,25 mm em no ponto A5 e 0,09 a 0,15 mm no ponto A6 (Figura 30). O decréscimo é evidente em A5, devido à presença de um valor de D_{50} muito maior próximo ao fundo. O gráfico para o ponto A6 mostra o inverso, onde os maiores valores de D_{50} estão presentes a partir da metade da coluna d'água até a superfície (Figura 30).

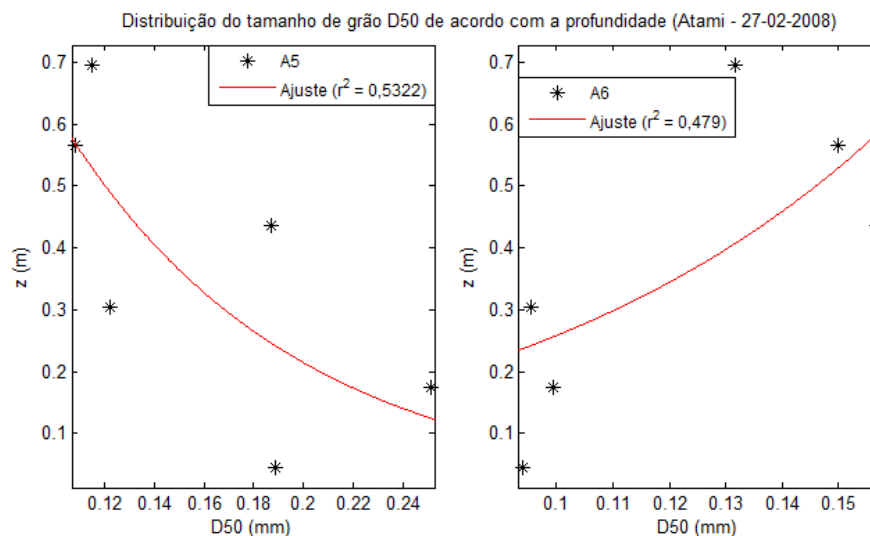


Figura 30: Distribuição do diâmetro médio das partículas (D_{50}) de acordo com a altura da coluna de água (z), para os pontos A5 e A6.

5.3.2 Caravelas

O perfil praiar Caravelas apresenta um declive moderadamente acentuado e o início de um sistema banco e cava (Figura 31). A primeira estrutura foi posicionada na cava, representada por C5 e a segunda no início do banco, indicada por C6 (Figura 31).

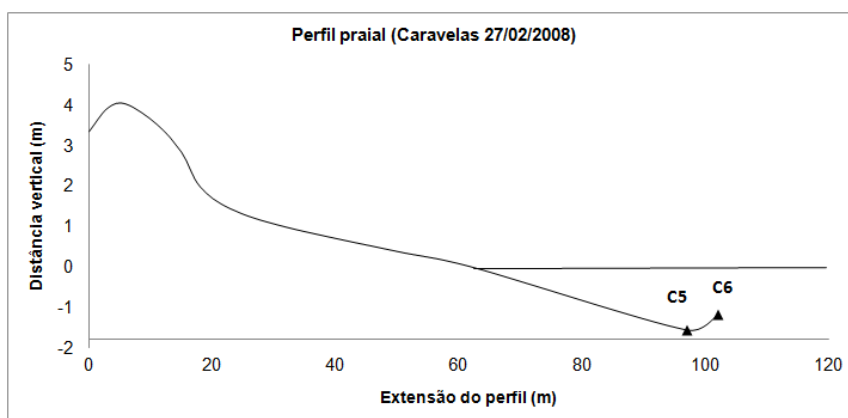


Figura 31: Perfil praiar obtido durante a coleta do dia 27/02/2008 para o ponto Caravelas, mostrando a localização de cada armadilha (C5 e C6) e suas respectivas profundidades, relativas ao nível do mar no momento das medições.

Em relação às concentrações medidas, a variação foi de 0,108 - 0,847 g/L no ponto C5 e 0,124 - 0,820 g/L no ponto C6 (Figura 32). Os valores são próximos, e a variação entre os dois pontos é percebida melhor na forma de distribuição destes valores de acordo com a profundidade. Em C5 há um decréscimo gradual enquanto C6 apresenta uma súbita diminuição próxima ao fundo. Nenhum dos modelos de concentração se mostrou adequado aos valores medidos. Os valores calculados foram maiores para o ponto C5 e menores para o ponto C6 (Figura 32)

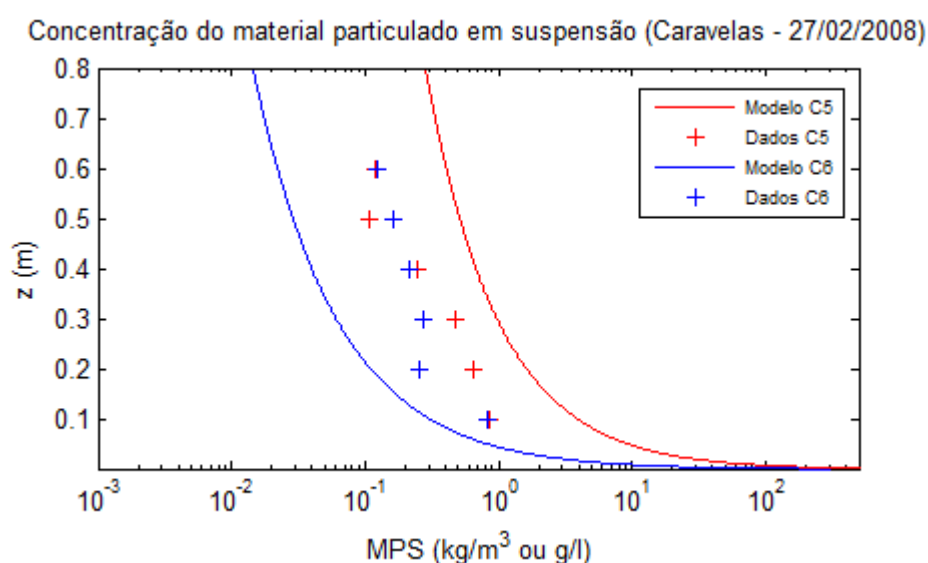


Figura 32: Perfis verticais de concentração de sedimentos, MPS (g/L ou Kg/m³) transportado pela corrente longitudinal de acordo com a altura na coluna d'água para um período de 10 minutos no perfil Caravelas (27/02/2008).

A distribuição dos valores de D_{50} foi de 0,13 a 0,22 mm em no ponto C5 e 0,15 a 0,22 mm no ponto C6 (Figura 33). Nos dois casos o ajuste foi consideravelmente bom, indicando decréscimo de D_{50} com a diminuição da profundidade (Figura 33).

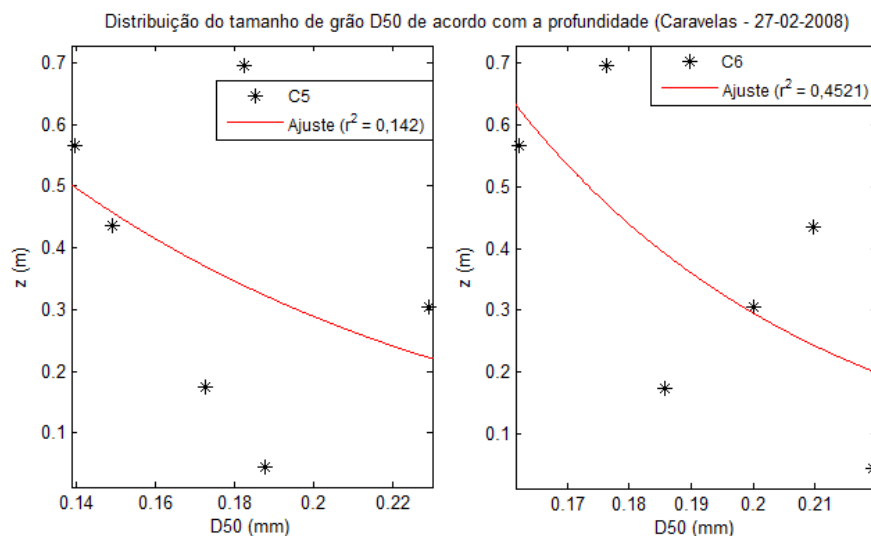


Figura 33: Distribuição do diâmetro médio das partículas (D_{50}) de acordo com a altura da coluna de água (z), para os pontos C5 e C6.

5.3.3 Praia Brava

O perfil Praia Brava para o dia 27 de fevereiro apresentava uma berma muito pronunciada e um perfil abrupto próximo à linha d'água, o que indica uma acumulação de sedimentos alargando a praia, representando um perfil construtivo típico da estação de verão. O posicionamento das duas armadilhas na zona de surfe teve 20 m de distância e está representado por PB5 e PB6 (Figura 34)

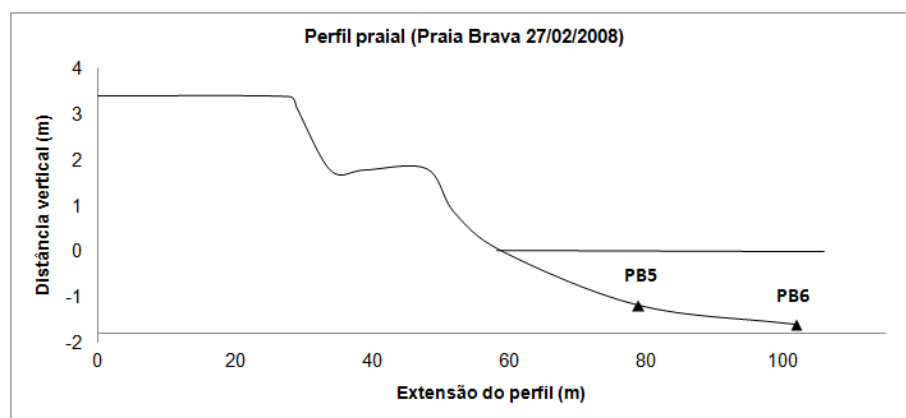


Figura 34: Perfil praial obtido durante a coleta do dia 27/02/2008 para o ponto Praia Brava, mostrando a localização de cada armadilha (PB5 e PB6) e suas respectivas profundidades, relativas ao nível do mar no momento das medições.

Na Praia Brava o primeiro valor de concentração próximo ao fundo no ponto PB6 mostra um valor discrepante (Figura 35). Os valores ficaram entre 0,006 - 0,231 para PB5 e 0,003 - 0,018 para PB6, e há bastante similaridade na distribuição destes dados ao longo da altura da coluna d'água (z). Entre os dois modelos, apenas o PB6 se mostrou adequado aos valores calculados a partir dos sedimentos coletados, enquanto o modelo PB6 foi superestimado em até 3 ordens de magnitude (Figura 35).

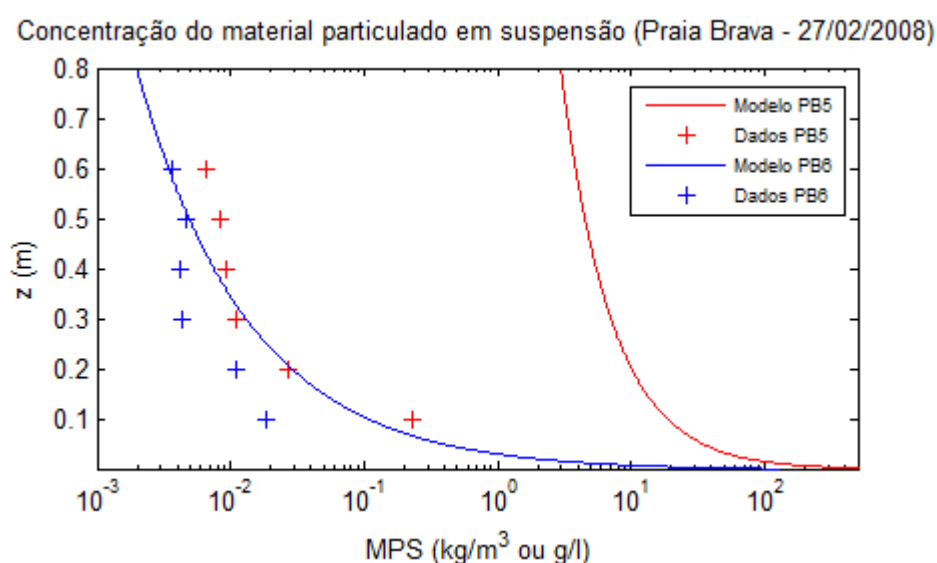


Figura 35: Perfis verticais de concentração de sedimentos, MPS (g/L ou Kg/m³) transportado pela corrente longitudinal de acordo com a altura na coluna d'água para um período de 10 minutos no perfil Praia Brava (27/02/2008).

Um intervalo de 0,19 a 0,26 mm foi observado nos valores de D_{50} para o ponto PB5, e 0,14 a 0,19 mm no ponto PB6 (Figura 36). No primeiro ponto os dados claramente mostram decréscimo no tamanho de D_{50} de acordo com z , porém o segundo ponto não apresenta boa correlação e um leve aumento no tamanho D_{50} (Figura 36).

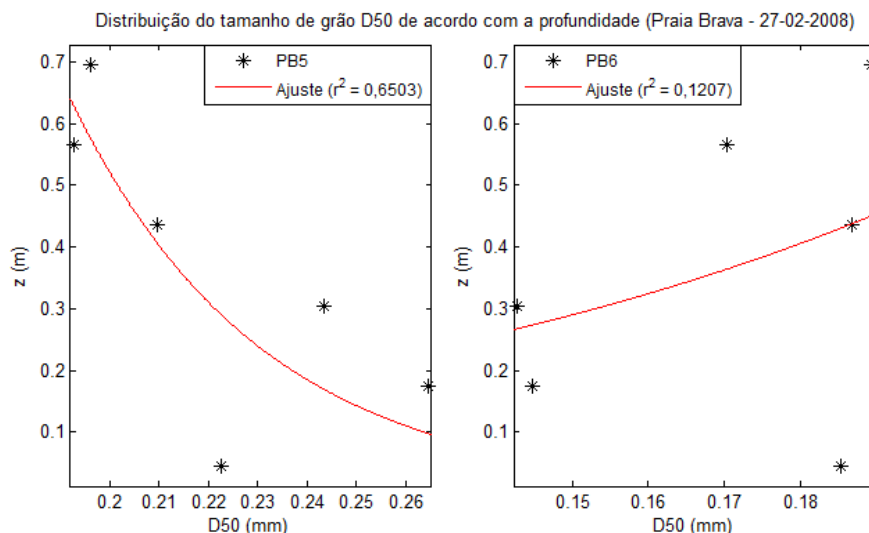


Figura 36: Distribuição do diâmetro médio das partículas (D_{50}) de acordo com a altura da coluna de água (z), para os pontos PB5 e PB6.

5.4 QUARTA COLETA – 19 DE MARÇO DE 2008

Mesmo em condições de verão, a corrente longitudinal para esta coleta estava para norte, mas bem menos intensa, possibilitando comparar numa escala sazonal se a passagem dos sistemas frontais e as ondulações de swell consequentes realmente são fortes mobilizadores de sedimento para a costa do litoral do Paraná. Desta vez o maior ângulo de orientação de ondas foi observado na Praia Brava, que também apresentou correntes mais significativas (Tabela 4). A maior altura de onda também foi observada na Praia Brava (0,6 m), com maior período de onda (11 s). As condições hidrodinâmicas para Atami e Caravelas estavam semelhantes, porém a corrente no Atami estava quase nula, mesmo com ângulo de orientação de ondas de 8 graus (Tabela 4).

Tabela 4: Condições hidrodinâmicas predominantes durante a coleta do dia 19/03/2008.

Coleta	Hora	t (min)	U_L (m/s)	H (m)	T (s)	α (graus)	Direção
Atami	07:40	10	0,01	0,30	7	8	N
Caravelas	10:30	10	0,30	0,50	7	5	N
Praia Brava	12:00	10	0,37	0.60	11	10	N

5.4.1 Atami

O último perfil obtido para a praia do Atami em março de 2008 está representado na figura 37. A posição onde cada armadilha permaneceu pelo período de 10 minutos está representada por A7 e A8, com uma distância de aproximadamente 30 m entre cada coleta (Figura 37).

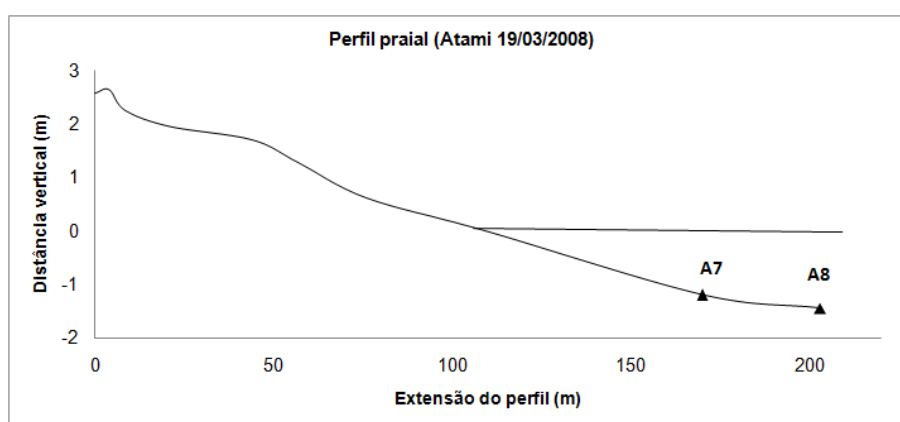


Figura 37: Perfil praiado obtido durante a coleta do dia 19/03/2008 para o ponto Atami, mostrando a localização de cada armadilha (A7 e A8) e suas respectivas profundidades, relativas ao nível do mar no momento das medições.

As concentrações de sedimento coletadas na praia do Atami estão ilustradas na figura 38, onde podem ser identificadas concentrações na escala de 0,019 - 0,291 g/L para o ponto A7 e 0,023 - 0,294 g/L para o ponto A8 (Figura 38).

Os dois perfis são semelhantes ao longo de toda a profundidade, apresentando um valor muito próximo na altura 0,1 m. O modelo A7 tem um ajuste muito bom para os valores medidos, porém o modelo A8 apresenta dados de concentração bem inferiores aos obtidos através do material particulado em suspensão no respectivo ponto (Figura 38).

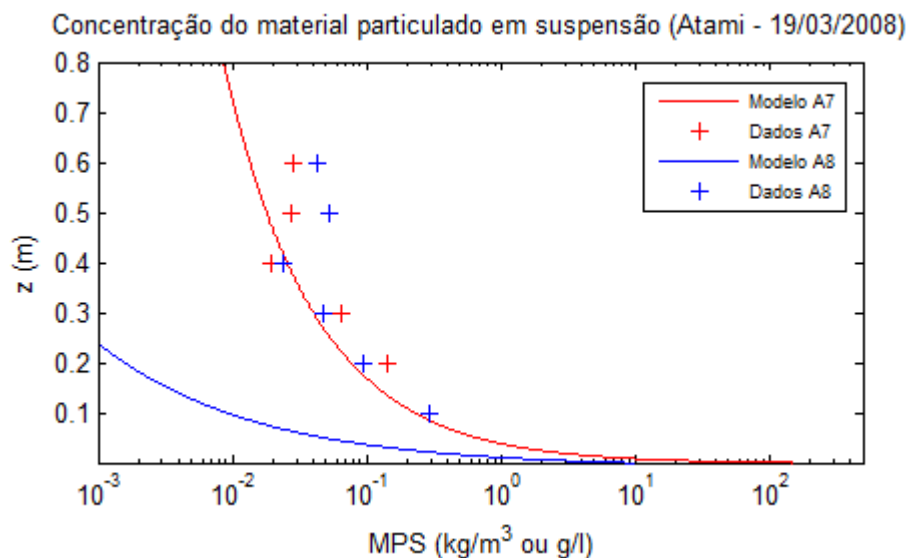


Figura 38: Perfis verticais de concentração de sedimentos, MPS (g/L ou Kg/m³) transportado pela corrente longitudinal de acordo com a altura na coluna d'água para um período de 10 minutos no perfil Atami (19/03/2008).

Em relação ao tamanho de grão na praia do Atami, foram encontrados valores de D_{50} entre 0,11 e 0,29 mm em no ponto A7 e 0,09 e 0,15 mm no ponto A8 (Figura 39). O decréscimo é evidente em A7, devido à presença de um valor de D_{50} muito maior próximo ao fundo. O gráfico para o ponto A8 mostra o inverso, onde os maiores valores de D_{50} estão presentes a partir da metade da coluna d'água até a superfície (Figura 39).

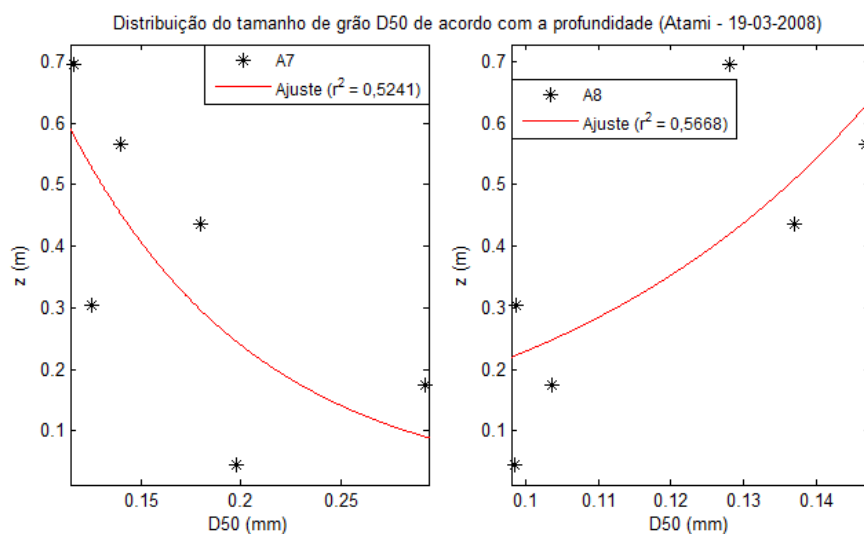


Figura 39: Distribuição do diâmetro médio das partículas (D_{50}) de acordo com a altura da coluna de água (z), para os pontos A7 e A8.

5.4.2 Caravelas

Novamente o perfil na praia de Caravelas apresenta um banco arenoso próximo à linha d'água (Figura 40) onde foi colocada a estrutura C8. A armadilha C7 foi colocada junto à cava, bem próxima ao banco (Figura 40).

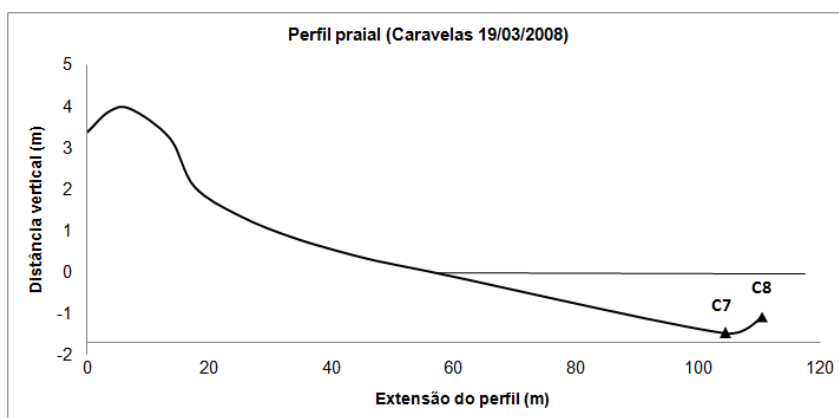


Figura 40: Perfil praiado obtido durante a coleta do dia 19/03/2008 para o ponto Atami, mostrando a localização de cada armadilha (C7 e C8) e suas respectivas profundidades, relativas ao nível do mar no momento das medições.

Para o perfil Caravelas foram obtidos dados de concentração do material particulado em suspensão com valores muito baixos, entre 0,001 - 0,031 g/L no ponto C7 e 0,001 - 0,009 g/L no ponto C8 (Figura 41). A distribuição destes valores ao longo da altura da coluna d'água não mostrou nenhum padrão aparente e o modelo que mais se aproximou na predição dos valores de concentrações foi o modelo C8 (Figura 41).

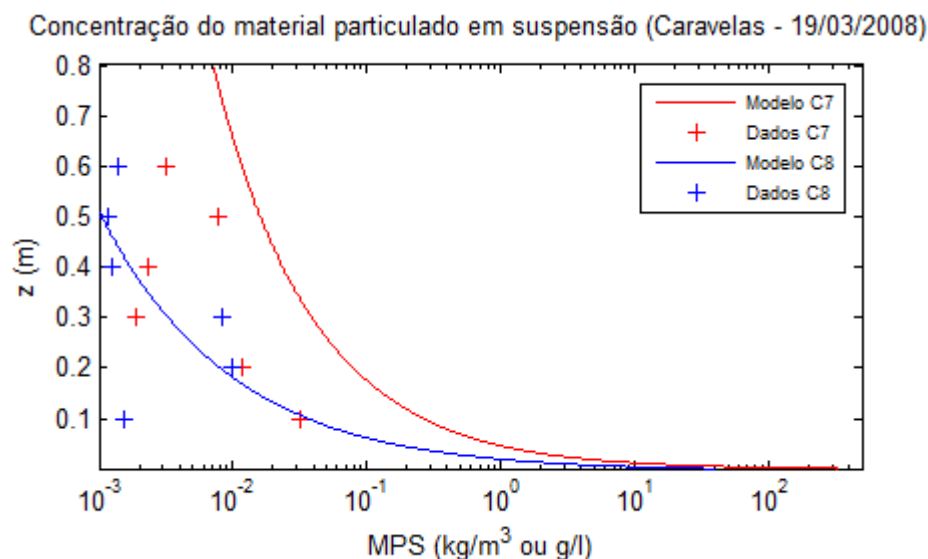


Figura 41: Perfis verticais de concentração de sedimentos, MPS (g/L ou Kg/m³) transportado pela corrente longitudinal de acordo com a altura na coluna d'água para um período de 10 minutos no perfil Caravelas (19/03/2008).

A variação diâmetro médio do grão D_{50} para o ponto Caravelas pode ser visualizada na figura 42, onde os valores encontrados ficam entre 0,14 e 0,23 mm no ponto C7 e entre 0,16 e 0,21 mm no ponto C8. Houve decréscimo nos valores de D_{50} (maiores próximo ao fundo) com um bom ajuste apenas no ponto C8 (Figura 42).

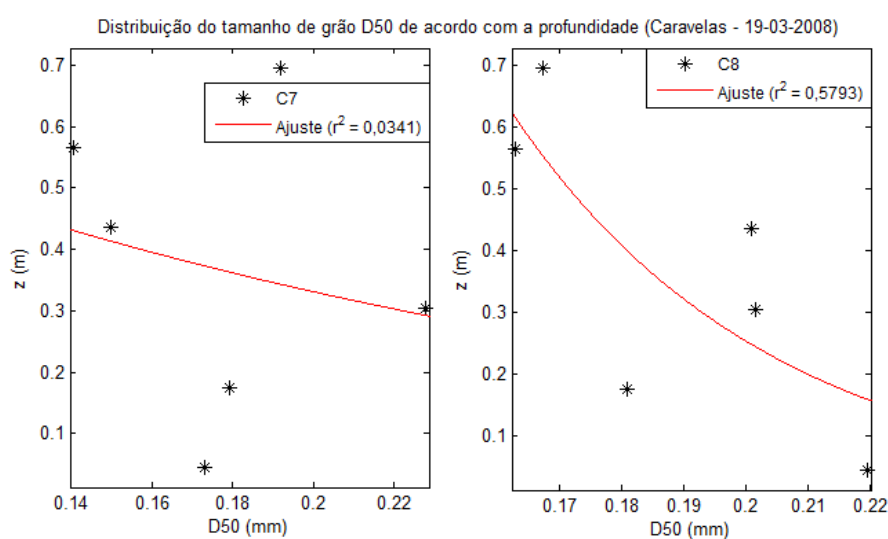


Figura 42: Distribuição do diâmetro médio das partículas (D_{50}) de acordo com a altura da coluna de água (z), para os pontos C7 e C8.

5.4.3 Praia Brava

O perfil Praia Brava mostra uma depressão anterior à berma, que está bem definida. O posicionamento das duas armadilhas na zona de surfe teve aproximadamente 10 m de distância e está representado por PB7 e PB8 (Figura 43)

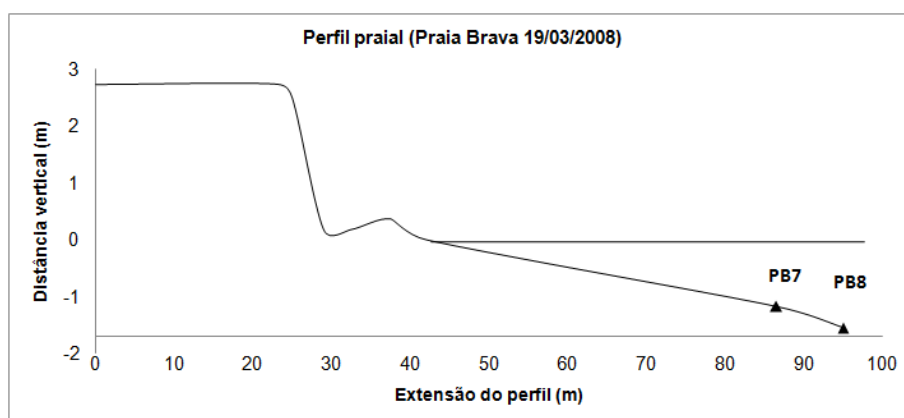


Figura 43: Perfil praiado obtido durante a coleta do dia 19/03/2008 para o ponto Praia Brava, mostrando a localização de cada armadilha (PB7 e PB8) e suas respectivas profundidades, relativas ao nível do mar no momento das medições.

Em relação às concentrações medidas, a variação foi de 0,010 - 0,325 g/L no ponto PB7 e 0,045 - 0,326 g/L no ponto PB8 (Figura 44). Os valores são próximos, e a variação entre os dois pontos é percebida mais claramente apenas na forma de distribuição destes valores de acordo com a profundidade. Em PB8 há um decréscimo gradual enquanto PB7 apresenta uma súbita diminuição próximo à superfície. Nenhum dos modelos de concentração se mostrou adequado aos valores medidos. Os valores calculados foram maiores para o ponto PB7 e menores para o ponto PB8 (Figura 44).

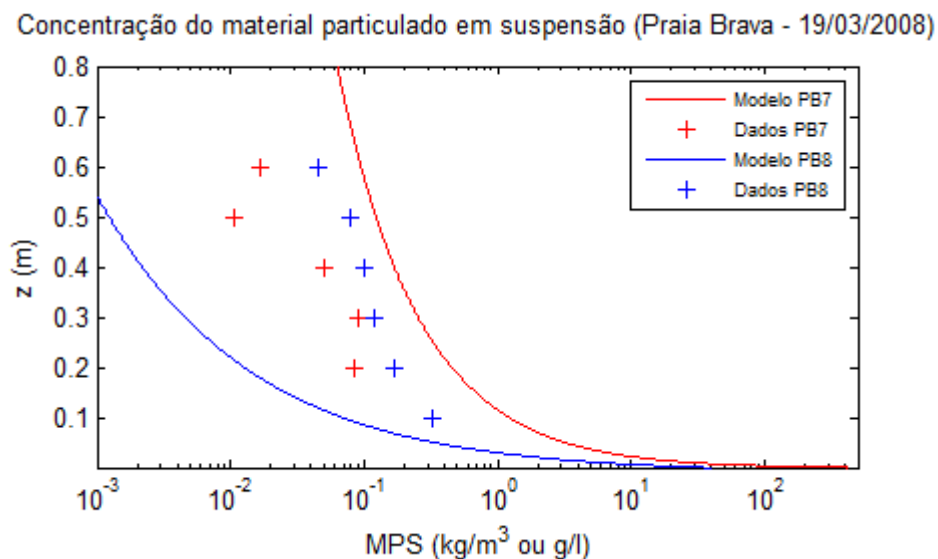


Figura 44: Perfis verticais de concentração de sedimentos, MPS (g/L ou Kg/m^3) transportado pela corrente longitudinal de acordo com a altura na coluna d'água para um período de 10 minutos no perfil Praia Brava (19/03/2008).

Um intervalo de 0,14 – 0,26 mm foi observado nos valores de D_{50} para o ponto PB7, e 0,14 a 0,19 mm no ponto PB8 (Figura 45). No primeiro ponto os dados claramente mostram decréscimo no tamanho de D_{50} de acordo com z , porém o segundo ponto não apresenta boa correlação e um leve aumento no tamanho D_{50} (Figura 45).

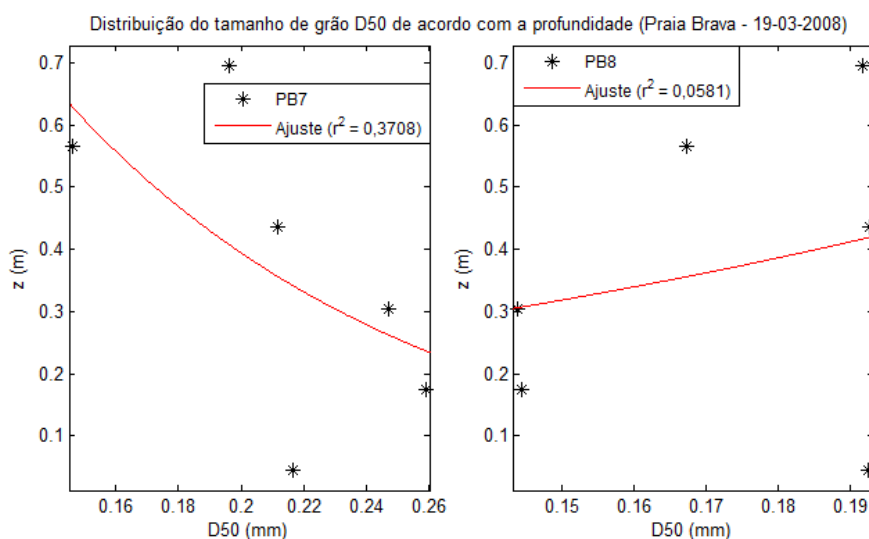


Figura 45: Distribuição do diâmetro médio das partículas (D_{50}) de acordo com a altura da coluna de água (z), para os pontos PB7 e PB8.

5.5 TAXAS DE TRANSPORTE LONGITUDINAL

Um estudo de caso foi realizado utilizando dados referentes a algumas condições hidrodinâmicas encontradas nas coletas de campo. As taxas do transporte longitudinal foram calculadas a partir da recente equação de Bayram *et al.* (2007) (equação 14); utilizando dados granulométricos do sedimento transportado em suspensão (D_{50S}). As velocidades de corrente e alturas de ondas foram relacionadas a tamanhos de grão específicos encontrados nas amostras e cada taxa está relacionada principalmente com este último fator.

Sabendo que quase todos os modelos se baseiam em taxas calculadas usando o tamanho médio do grão do sedimento que compõe o fundo (D_{50S}), para estimar qual é o tamanho das partículas em suspensão, foram calculadas taxas com estes valores a fim de comparar e verificar as discrepâncias nos resultados finais.

A Tabela 5 indica as alturas de ondas (H_b) utilizadas em cada ponto: Atami, Caravelas e Praia Brava. O ângulo de aproximação (α) foi mantido no valor constante de 10 graus. O tamanho médio do sedimento em suspensão (D_{50S}) foi obtido a partir da média das amostras coletadas pelas armadilhas e o tamanho médio do sedimento do fundo (D_{50F}) por amostragens diretas do sedimento do fundo em cada ponto. A velocidade da corrente longitudinal (U_L) para os pontos Atami, Caravelas e Praia Brava foi estabelecida considerando as médias de todos os valores encontrados, pois o objetivo principal é definir as variações causadas pela utilização de diferentes tamanhos de grão nos cálculos das taxas.

Tabela 5: Dados de alturas de ondas (H_b), ângulo de aproximação (α), D_{50} do sedimento em suspensão (D_{50s}), D_{50} do sedimento do fundo (D_{50F}) e velocidade da corrente longitudinal (U_L) para os pontos Atami, Caravelas e Praia Brava.

Atami	H_b	0,3	0,65	0,4	0,3
	α	10	10	10	10
	D_{50s}	0,114	0,121	0,141	0,146
	D_{50F}	0,18	0,18	0,18	0,18
	U_L	0,13	0,13	0,13	0,13
Caravelas	H_b	0,3	0,5	1,0	0,8
	α	10	10	10	10
	D_{50s}	0,169	0,183	0,184	0,194
	D_{50F}	0,172	0,172	0,172	0,172
	U_L	0,58	0,58	0,58	0,58
Praia Brava	H_b	0,4	0,4	0,6	1,0
	α	10	10	10	10
	D_{50s}	0,139	0,183	0,192	0,195
	D_{50F}	0,135	0,135	0,135	0,135
	U_L	0,57	0,57	0,57	0,57

Todas as representações gráficas estão nas mesmas escalas para critérios de comparação entre os diferentes pontos onde foram realizadas as coletas. A relação principal mostrada é a variação das alturas de ondas e consequente variação nas taxas (Q). As linhas “contínuas” foram obtidas através dos valores de D_{50F} e estimativas de transporte para cada local de coleta, com variações no tamanho de onda entre 0,1 m e 1,0 m. Os pontos com marcações coloridas representam as taxas calculadas pontualmente através dos valores de D_{50} para as alturas de onda específicas.

Para a praia do Atami (Figura 46) os valores são baixos, pois a velocidade da corrente utilizada é de apenas $0,13 \text{ ms}^{-1}$. Entretanto, é possível notar que os valores para os quatro tamanhos de grão do sedimento em suspensão resultam em taxas maiores do que as calculadas utilizando os valores do sedimento do fundo (D_{50F}), que representam um sedimento de maior diâmetro.

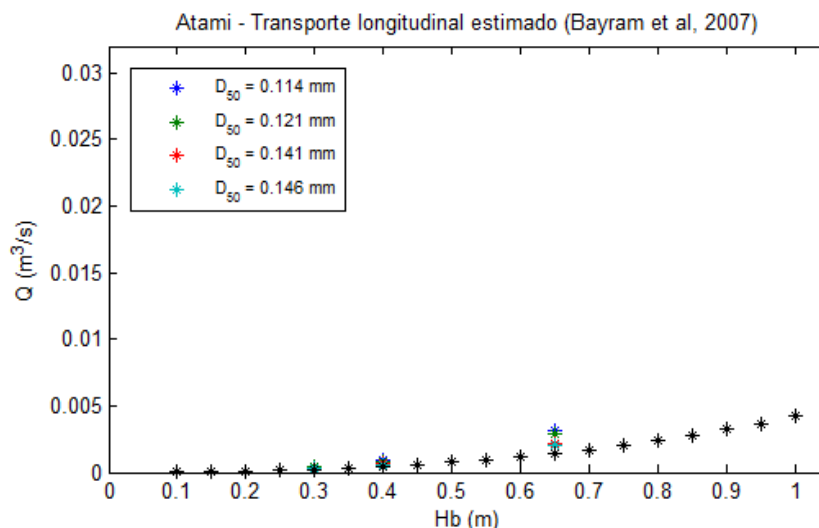


Figura 46: Taxas de transporte longitudinal estimadas para a praia do Atami através da equação de Bayram et al, (2007).

No ponto Caravelas, as taxas são relativamente mais altas que para o Atami, devido às maiores velocidades de corrente e alturas de ondas. As estimativas utilizando o tamanho médio do sedimento do fundo revelam valores ligeiramente menores, sob condições de altura de onda de aproximadamente 0,5 m, sendo que a discrepância se torna maior para maiores alturas de onda (Figura 47). Apenas um valor de D_{50s} apresenta correlação com D_{50F} , pois a diferença encontrada entre os valores do fundo e do material em suspensão é de apenas 0,01 mm.

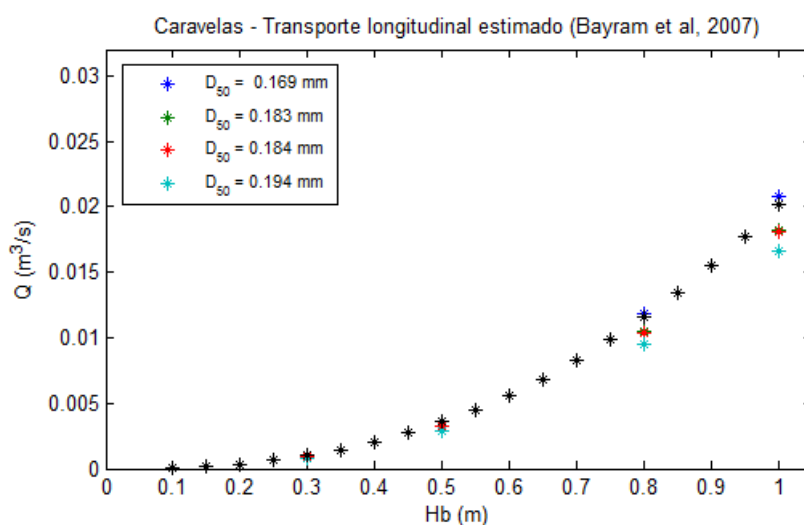


Figura 47: Taxas de transporte longitudinal estimadas para a praia de Caravelas através da equação de Bayram et al, (2007).

As maiores taxas utilizando a fórmula de Bayram foram encontradas para a Praia Brava (Figura 48). Um conjunto de fatores foi responsável pelos valores elevados, como velocidade da corrente, altura das ondas e principalmente o diâmetro médio do sedimento, tanto do fundo como em suspensão. Porém, as taxas estimadas através do valor D_{50F} resultaram em valores expressivamente elevados, se comparadas com as taxas obtidas através do tamanho médio D_{50S} .

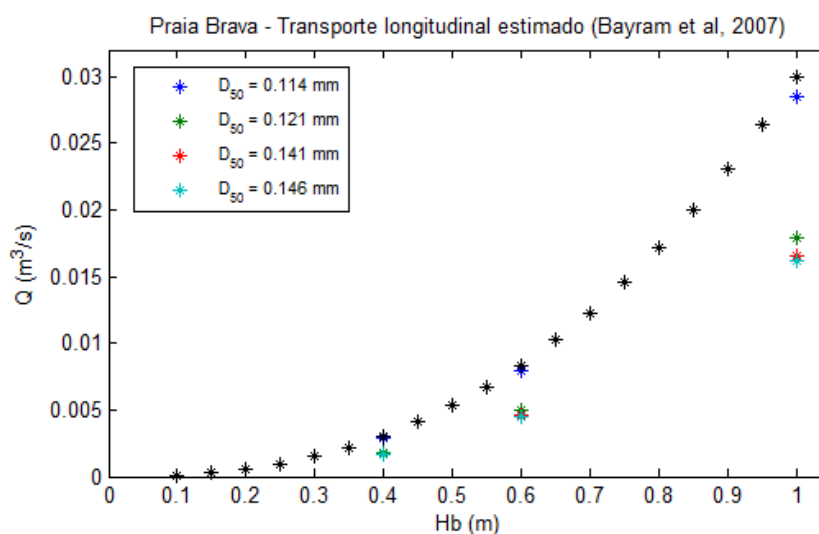


Figura 48: Taxas de transporte longitudinal estimadas para a Praia Brava de Matinhos através da equação de Bayram et al, (2007)

6 DISCUSSÃO

Os resultados obtidos trazem inúmeras informações, as quais serão sintetizadas e discutidas considerando três aspectos principais, relacionados aos principais parâmetros encontrados e divididos em: a) variações dos perfis verticais de concentração relacionados às condições hidrodinâmicas; b) variação granulométrica dos sedimentos transportados e c) taxas de transporte longitudinal.

Os três pontos estudados podem ser classificados quanto às suas características morfométricas e hidrodinâmicas (Tabela 6). Com relação ao tamanho médio de grão do sedimento do fundo e do sedimento em suspensão há variações importantes, que serão consideradas no item que trata sobre a granulometria utilizada nos modelos de concentração de taxas de transporte. De uma forma geral, o tamanho médio das partículas em suspensão varia em relação ao sedimento do fundo. Na praia do Atami os valores de D_{50F} são maiores que D_{50S} ; na praia Brava observou-se o inverso e na praia de Caravelas os valores são semelhantes.

Tabela 6: Características dos três locais estudados, detalhando: descrição geral da praia, diâmetro médio do sedimento em suspensão, diâmetro médio do sedimento do fundo, altura de onda e períodos de onda medidos.

Local	Descrição	D_{50S} (mm) suspensão	D_{50F} (mm) fundo	H (m)	T (s)
Atami	Extensa, associada à desembocadura estuarina, dissipativa, micromaré.	0,11 a 0,14	0,180	0,30 a 0,65	7 - 9
Caravelas	Média extensão, oceano aberto, intermediária, micromaré.	0,16 a 0,19	0,172	0,30 a 1,00	7 - 12
Praia Brava	Curta, apresenta problemas erosivos, intermediária, micromaré, próxima a promontórios rochosos.	0,14 a 0,19	0,135	0,40 a 1,00	8 - 11

6.1 DADOS HIDRODINÂMICOS

As alturas de onda medidas para a zona de surfe variaram entre 0,3 e 1,0 m, o período ficou entre o máximo de 12 segundos e o mínimo de 7 segundos, e o ângulo de aproximação das ondas entre 1° e 10° (Tabela 7).

As correntes fluíam na maioria das coletas para norte, que é a direção dominante na costa sul brasileira (Esteves, 2004). Em apenas um dia de amostragem, que foi realizada na praia Brava, Atami e Caravelas, foram registradas correntes para sul. As maiores velocidades observadas foram de 1,46 m/s no ponto Caravelas e a mínima de 0,01 m/s, no Atami (Tabela 7). Em pelo menos duas outras tentativas de amostragem, a corrente estava muito fraca, impedindo a coleta de sedimentos. Isto ilustra o quanto variável é a direção e a velocidade da corrente longitudinal na área de estudo.

A velocidade das correntes geradas varia primeiramente em função da altura e ângulo de aproximação das ondas, e secundariamente em função dos diferentes períodos (Tabela 7), e influencia a concentração de sedimentos transportados, o que será discutido posteriormente.

Tabela 7: Condições hidrodinâmicas predominantes durante todas as coletas.

Coleta	Data	Hora	t (min)	U_L (m/s)	H (m)	T (s)	α	Direção
Atami	26/07/07	10:00	10	0,22	0,65	9	5	N
Caravelas		12:00	6	1,46	0,80	10	5	N
Praia Brava		14:00	5	0,76	0,40	9	3	N
Atami	26/08/07	17:00	10	0,01	0,30	8	1	N
Caravelas		13:00	5	0,19	0,30	12	5	N
Praia Brava		10:00	5	0,47	0,40	10	5	N
Atami	27/02/08	09:15	10	0,30	0,40	9	5	S
Caravelas		12:30	10	0,39	1,00	10	5	S
Praia Brava		14:30	10	0,71	1,00	8	3	S
Atami	19/03/08	07:40	10	0,01	0,30	7	8	N
Caravelas		10:30	10	0,30	0,50	7	5	N
Praia Brava		12:00	10	0,37	0,60	11	10	N

Excetuando-se a primeira coleta, que foi realizada logo após a passagem de uma frente fria pelo litoral paranaense, não foram observados efeitos de elevações anormais do nível do mar (marés meteorológicas ou marés de sizígia).

6.2 CONCENTRAÇÕES DE SEDIMENTOS

De uma forma geral, observou-se que a concentração de sedimentos varia ao longo da zona de surfe, sendo um pouco menor nos pontos de maior profundidade e reduzindo suavemente em direção à linha d'água. Via de regra, maior velocidade de corrente resulta em maior concentração de sedimentos, tanto na distribuição ao longo da zona de surfe como quanto na vertical, através da coluna d'água.

6.2.1 Atami

O diâmetro médio encontrado para o sedimento que compõe o fundo na praia do Atami (ver Tabela 6) não apresentou valores semelhantes aos usualmente encontrados na literatura (e.g. Bigarella *et al.*, 1978; Soares *et al.*, 1996). O menor tamanho de grão que compõe esta praia segundo estes autores e a proximidade com a desembocadura da baía de Paranaguá seriam responsáveis por um caráter mais dissipativo. No entanto, os maiores valores de D_{50F} na primeira amostragem (0,18 mm) podem refletir condições de maior energia na zona de surfe, logo após a passagem de uma frente fria durante a primeira amostragem. Sob tais condições hidrodinâmicas, o sedimento do fundo é remobilizado e grande parte das partículas de areia muito fina permanecem em suspensão, enquanto o sedimento mais grosso predomina próximo ao fundo.

Na primeira coleta realizada, os dois perfis de concentração não apresentam a clássica diminuição na quantidade de sedimento de acordo com a diminuição da

profundidade e desenvolvem uma forma bastante diferente. A estrutura mais próxima da água (A1), de acordo com o perfil foi a que apresentou uma distribuição ligeiramente mais homogênea. A homogeneidade nos perfis geralmente se deve à menor turbulência gerada nas regiões mais rasas, onde os sedimentos do fundo não são constantemente ressuspensos. A estrutura A2 por outro lado apresentou a maior quantidade de sedimento na profundidade aproximada de 20 cm, próximo ao fundo e depois apenas na superfície. Perfis como este podem identificar regiões onde a quebra de ondas e a turbulência gerada por vórtices interferem na corrente longitudinal, causando sua interrupção em algumas porções de acordo com a profundidade.

Na segunda coleta o ângulo de aproximação de ondas no Atami estava nulo, sem definição nenhuma de corrente. Devido à quase ausência de correntes, os perfis de concentração de sedimento para o Atami mostram apenas algumas variações aleatórias, com concentrações muito baixas de sedimentos ressuspensos pelas ondas entrando num movimento difuso. Mesmo assim observou-se novamente a homogeneidade do perfil na parte mais rasa.

Para a terceira coleta, representativa de condições de verão, as concentrações de sedimentos transportados no Atami respondem a um perfil com diminuição constante até a superfície e muito acentuada no fundo. O tempo de permanência para as duas estruturas foi de 10 minutos e sua localização no perfil bastante próxima. Mesmo assim a diferença na concentração entre os dois perfis foi extrema, variando em duas ordens de magnitude.

A diferença é maior na parte próxima ao fundo, o que leva a crer que algum erro de amostragem, como perturbação do leito marinho quando manipulando o instrumento, pode ter causado a grande disparidade de valores.

A concentração de sedimentos transportados foi pequena no Atami, na última coleta, num perfil de distribuição consideravelmente regular e homogêneo, como já citado anteriormente. A estrutura mais próxima da linha de costa foi a que teve menores concentrações próximo à superfície, representada por A7. Muito pouco pode ser inferido sobre concentrações de sedimento sob condições de correntes fracas, pois até as perturbações resultantes do movimento ondulatório causam movimentação de sedimentos, e não necessariamente a corrente longitudinal.

6.2.2 Caravelas

Na primeira coleta realizada no ponto Caravelas, foram obtidas concentrações de sedimento uma ordem de magnitude maior que para a mesma data no ponto Atami, mesmo com um tempo de permanência menor de 6 minutos. A velocidade da corrente se mostra como o principal fator responsável pela grande quantidade de sedimentos sendo transportados com um valor de 1,46 m/s. As duas estruturas, C1 e C2 apresentaram curvas de concentração bastante similares, e com a clássica diminuição da concentração de acordo com a profundidade.

O mesmo pode ser observado na segunda coleta, onde as concentrações de partículas sendo transportadas no ponto Caravelas foram até uma ordem de magnitude maiores do que no Atami. Porém, as curvas mostram um formato diferenciado, pois as maiores concentrações não estão necessariamente próximas ao fundo na estrutura C4, mas na profundidade de 40 cm. O inverso ocorreu na estrutura C3, que apresentou um perfil logarítmico de decréscimo das concentrações até a superfície. Estes perfis distintos estão associados à influência das ondas e sua capacidade de gerar turbulência em porções diferentes da coluna d'água, mantendo ou não os sedimentos em suspensão por um tempo maior.

Novamente, na terceira coleta as concentrações de sedimentos transportados na praia de Caravelas foram consideravelmente maiores que no Atami, considerando que o valor mais alto observado naquele caso se tratou de um provável erro de amostragem na estrutura A5. Com correntes no sentido sul, a configuração observada no perfil C5 é quase contínua, exceto devido à menor quantidade de sedimentos profundidade de 20 cm. Já para a estrutura C6 que foi posicionada numa parte mais distante da linha de costa, porém mais rasa, há maior quantidade de sedimento sendo transportada na parte média, e não no fundo como geralmente se observa. Uma possível razão é justamente a profundidade menor, significando que a coleta pode ter sido feita em cima do início de um banco arenoso, onde a quebra de ondas é mais acentuada, remobilizando grande parte do sedimento do fundo e o colocando em suspensão rapidamente, por isso a menor concentração próximo ao fundo.

O mesmo “banco arenoso” foi identificado no perfil da quarta coleta, onde foi colocada a estrutura C8. Isso representa uma configuração típica de inverno em

praias intermediárias, pois é a época em que a berma é destruída e os bancos submersos mantêm e “armazenam” estes sedimentos. Talvez esse banco seja evidência de um transporte transversal, no sentido da praia. Seria a migração de um banco até a formação do perfil construtivo de verão, o que já foi verificado em alguns estudos de perfis que identificaram grandes diferenças volumétricas para o ponto de Caravelas (Quadros, 2002).

No período de verão há uma distribuição heterogênea das concentrações de sedimentos ao longo da coluna d'água, e neste caso foram concentrações muito pequenas se comparadas às observadas para o período de inverno. O que pode acontecer é que mesmo existindo correntes e transporte, este não é tão intenso quando a região litorânea está exposta aos ventos de nordeste. Esses ventos podem agir por um período de tempo maior e serem mais constantes que os sistemas frontais, mas provocam uma mobilização de sedimentos menos efetiva.

6.2.3 Praia Brava

As concentrações de sedimento transportado na Praia Brava foram maiores se comparadas ao Atami, levando em consideração que permaneceram submersas por apenas 5 minutos na primeira coleta, mas também não são tão grandes quanto as concentrações do perfil Caravelas. As maiores taxas representam a amostragem mais próxima da linha d'água (PB1), apenas diminuindo bruscamente próximo à superfície, o que pode ser explicado pela provável exposição desta rede, que não ficou todo o tempo submersa.

Na segunda amostragem para a Praia Brava, as duas estruturas foram colocadas em pontos muito próximos e portando era esperado que exibissem um padrão de curvas semelhante e também concentrações aproximadas. Na verdade isto não foi observado, porém não há diferenças muito discrepantes e os valores ficaram em aproximadamente 10^{-1} g/L. Isto evidencia que mesmo em condições muito parecidas, algumas variações sempre acontecem e devem ser levadas em consideração ao se analisar a dinâmica praial baseada em modelagens que inferem muitos dados esperando um padrão único.

O perfil Praia Brava para a terceira amostragem apresentava uma berma muito pronunciada e um perfil abrupto próximo à linha d'água, o que indica um acúmulo de sedimentos, alargando a praia, caracterizando um perfil construtivo típico da estação de verão.

Na Praia Brava ocorreu o mesmo que para o Atami neste mesmo dia, ou seja, a primeira profundidade da estrutura PB5 revelou uma concentração duas ordens de magnitude maior que o resto da distribuição. No restante da coluna d'água há uma distribuição bastante homogênea, porém considerando que neste ponto houve a maior velocidade de corrente, o transporte foi muito baixo. Não foi encontrada uma explicação razoável para estes valores baixos.

A quarta coleta apresentou maiores concentrações, assim como velocidades elevadas. Os perfis praticamente obedeceram à clássica diminuição da concentração de acordo com a profundidade, sendo que onde houve maior concentração no ponto mais distante da linha d'água.

6.2.4 Considerações gerais

A praia do Atami é caracterizada por um perfil topográfico mais suave e com características dissipativas e as ondas se aproximam de forma mais paralela à costa e com menores alturas, gerando correntes longitudinais mais fracas. Portanto, era esperado que neste ponto as concentrações de material particulado transportadas fossem menores do que nos outros locais, o que não foi observado. O ponto Caravelas foi o que apresentou as maiores concentrações (até 1,042 g/L), seguido do ponto Atami, que apresentou concentrações de até 0,796 g/L.

Contrariamente ao esperado, o ponto afetado por processos erosivos (Praia Brava) apresentou as menores concentrações de material transportado (até 0,326 g/L). Portanto, pode-se sugerir que esta região apresenta processos erosivos intensos, porém eles estariam muito mais relacionados à urbanização muito próxima à linha de costa do que devido às altas taxas de transporte. Em hipótese, obras de engordamento praial com sedimentos com tamanho médio de grão semelhantes ao presente atualmente (0,18 mm), seriam suficientes para manter a praia estável.

6.2.5 Curvas de concentração geradas pelos modelos

A correlação entre os perfis de concentração calculados a partir dos dados das armadilhas e os estimados pelo modelo não foi significativa em grande parte dos casos. Assim como as observações de campo, as aproximações matemáticas estão sujeitas a um grande número de erros, os quais, em ausência de um significativo número de dados detalhados sobre as concentrações reais transportadas, são difíceis de quantificar.

Entretanto, há um número razoável de possíveis fontes de erros que devem ser comentadas. O primeiro está relacionado com o valor utilizado para definir o tamanho médio de grão do fundo e a rugosidade derivada apenas do tamanho das partículas. O segundo tem relação com a definição de rugosidade do fundo, que se baseia no conhecimento dos diâmetros específicos do sedimento no local de estudo e principalmente na estimativa das dimensões das formas de fundo presentes.

Apesar do primeiro item ser facilmente resolvido por extensas amostragens do sedimento do fundo, o segundo é mais complicado de medir no campo, e os erros têm consideráveis conseqüências. Se a rugosidade do fundo é definida unicamente pelo tamanho de grão (z_{0G}), como foi o caso deste estudo, os perfis de concentração estimados pelo modelo podem ser subestimados pelas fórmulas utilizadas e também por outros modelos (e.g. Nielsen, 1992).

Em todos os casos, os perfis medidos só serão compatíveis aos estimados se a rugosidade total, incluindo a que se refere às formas de fundo (z_{0R}), for adicionada ao modelo e validada utilizando um grande número de dados referentes a condições hidrodinâmicas variáveis.

6.2.6 Tipos de perfis

Os 24 perfis verticais de concentração de sedimentos em suspensão obtidos serviram para distinguir quatro grupos de perfis (Figura 49). Estes perfis foram

classificados quanto à sua forma e não foram identificados padrões específicos para cada uma das três praias.

O grupo I é composto por perfis que apresentam uma redução logarítmica constante na concentração de sedimentos com o afastamento do fundo (Figura 49). A concentração é de aproximadamente 10^0 g/L nos primeiros 10 cm do fundo e reduz em uma ou duas ordens de magnitude a 60 cm do fundo (até 10^{-2} g/L).

Os perfis do grupo II apresentam uma diminuição brusca na concentração de sedimentos de uma ordem de magnitude nos primeiros 30 cm a partir do fundo, seguido de uma redução pequena na concentração ou se mantendo homogêneos e constantes a partir dali para a superfície (Figura 49). Estes perfis podem estar associados à região rasa próxima à arrebentação, onde a quebra das ondas aumenta a mistura e a turbulência mantendo as areias finas e muito finas em suspensão na parte superior da coluna d'água enquanto as correntes longitudinais transportam o sedimento mais grosseiro com mais intensidade na região próxima ao fundo (Figura 49).

O grupo III apresenta perfis muito irregulares, caracterizados por reduções e aumentos na concentração de sedimentos em várias alturas da coluna d'água, sem uniformidade ou padrão. Estes perfis geralmente ocorrem em condições de correntes fracas ou em águas mais rasas próximo ao estirâncio. A turbulência gerada pelas ondas pode gerar muitos vórtices, que se propagam em direção à linha de costa e influenciam na concentração de sedimentos em todas as profundidades, enquanto a corrente longitudinal não é forte o suficiente para transportar estes sedimentos com regularidade (Figura 49).

O grupo IV apresenta uma distribuição vertical mais homogênea, sem mudanças importantes na concentração do sedimento em suspensão que oscila em torno de 10^{-1} g/L (Figura 49).

A redução logarítmica na concentração de sedimentos observada nos perfis do grupo I é semelhante às descritas na literatura (e.g. Wang *et al.* 2002). Perfis homogêneos como os do grupo IV também foram observados em estudos de laboratório por Wang *et al.* (2002), que atribuíram ao aumento da turbulência e mistura decorrente da arrebentação de ondas do tipo mergulhante.

Neste estudo não foram feitas observações referentes ao tipo de onda, portanto não é possível confirmar tal relação. Dois outros tipos de perfis (grupos II e III) foram observados neste estudo e não apresentam correspondência na literatura.

Mais dados são necessários para melhor compreender os processos que influenciam a distribuição vertical da concentração dos sedimentos em suspensão. Sabe-se que estão relacionados à interação entre a energia das ondas e as correntes longitudinais (e transversais) presentes na zona de surfe.

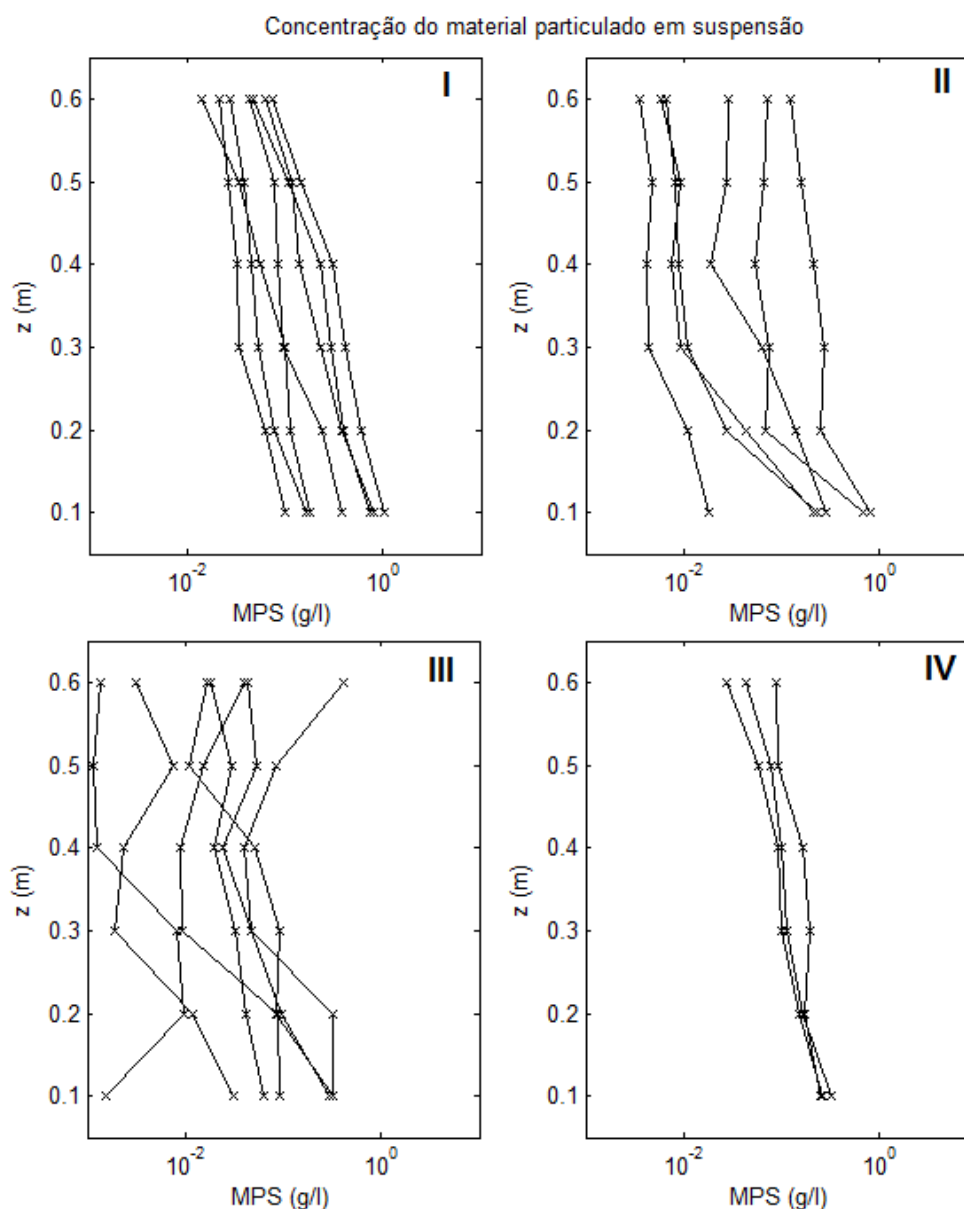


Figura 49: Diferentes formas dos perfis de concentração de sedimentos, calculados para todas as 24 coletas e representadas por I, II, III e IV.

6.3 VARIAÇÃO NA GRANULOMETRIA

As partículas em suspensão foram analisadas principalmente quanto à variação do tamanho médio de grão ao longo da coluna d'água e nas diferentes profundidades onde cada estrutura permaneceu durante as coletas. O ajuste através de curvas de tendência foi realizado para todas as amostras em suspensão, com o objetivo de verificar possíveis padrões de distribuição.

A correlação encontrada foi bastante variável, apresentando valores de r^2 entre 0,097 e 0,65, sendo que a média foi de 0,28. Valores de correlação próximos a 1 poderiam indicar que entre a zona mais próxima ao fundo e a zona próxima da superfície poderia haver um aumento ou decréscimo significativo nos diâmetros médios dos sedimentos em suspensão.

Apesar de não apresentar os melhores valores de correlação, em pelo menos 12 dos 24 pontos de coleta foi possível identificar uma tendência de decréscimo no tamanho médio do sedimento em suspensão com o decréscimo da profundidade (Figura 50). A maioria destes perfis está localizada na parte mais rasa do perfil, sugerindo que a influência das ondas não foi tão significativa a ponto de provocar mistura e maior homogeneidade ao longo de toda a coluna d'água.

Considerando que o tamanho médio do grão proveniente de amostras do sedimento do fundo D_{50F} é geralmente utilizado para representar o mesmo tamanho de grão dos sedimentos em suspensão D_{50S} , num perfil vertical homogêneo, os dados obtidos neste estudo servem para contestar a eficácia da utilização destes valores, pois foram observadas grandes variações no tamanho médio de grão das amostras coletadas em suspensão pelas armadilhas.

Observações como estas são importantes para definir melhor o comportamento das partículas de areia na zona de surfe e, por conseguinte, desenvolver métodos mais confiáveis para estimar as taxas do transporte longitudinal. Desta forma, um coeficiente relacionando a variação no diâmetro médio entre D_{50F} e D_{50S} poderia ser inserido nas equações para o cálculo de taxas de transporte. Ressalta-se, porém, que seria necessário um número maior de amostragens para que este coeficiente tivesse significância estatística.

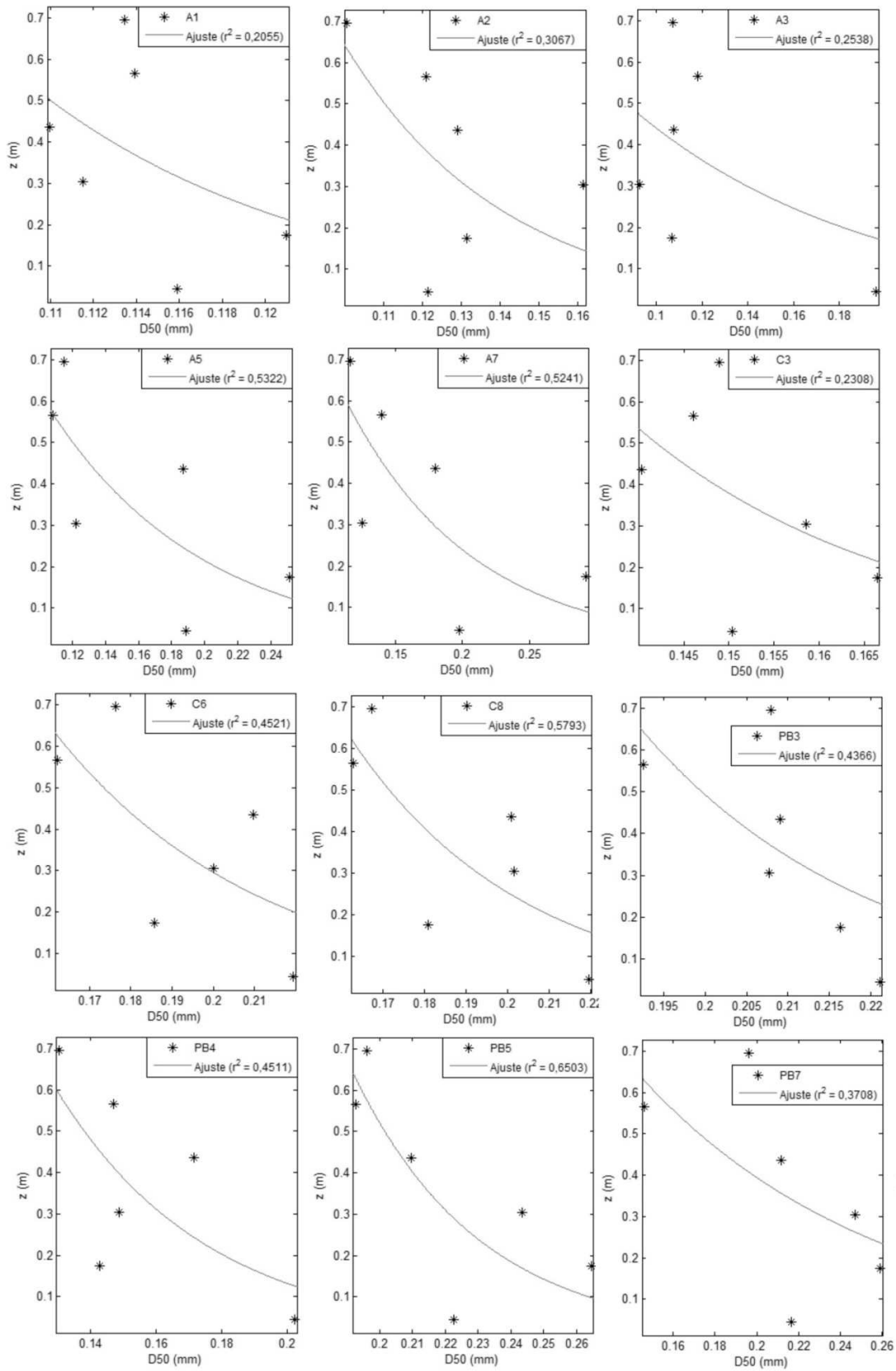


Figura 50: Distribuição do tamanho de grão D_{50} (mm) em suspensão de acordo com a altura da coluna de água z (m), para os pontos que apresentaram tendência de diminuição do tamanho de D_{50} com o decréscimo da profundidade.

6.4 TAXAS DE TRANSPORTE

Durante as últimas décadas os estudos relacionados ao transporte de sedimentos começaram a considerar tamanhos de grão não uniformes ao longo da zona de surfe, com o objetivo principal de gerar previsões mais confiáveis das taxas de transporte. Desta maneira, uma fórmula deveria ser validada com um extenso banco de dados que cobrisse diferentes condições hidrodinâmicas e características dos sedimentos.

Apesar de Bayram *et al.* (2007) não terem encontrado nenhuma relação evidente entre o seu coeficiente (ϵ) e o tamanho de grão dos sedimentos ou a velocidade de decantação das partículas, existe uma tendência de diminuição no valor de (ϵ) com valores crescentes de D_{50} na velocidade de decantação w_s . Portanto, o uso de um tamanho de grão maior implica em velocidades de decantação diferentes, que podem afetar significativamente o cálculo das taxas de transporte.

Os resultados obtidos neste trabalho aplicando a fórmula de Bayram *et al.* (2007) e utilizando o diâmetro médio da areia que compunha o fundo em cada local de coleta só mostraram taxas semelhantes aos calculados utilizando o tamanho real das partículas em suspensão quando as condições hidrodinâmicas não tinham muita energia. Naturalmente, se as alturas de onda são menores que 0,2 m, o transporte apresentará resultantes pouco significativas e outros fatores não terão tanta importância.

Porém, para alturas de onda maiores, as taxas calculadas diferem em grandes proporções. Para diâmetros de partículas maiores, a taxa de decantação w_s será maior, dificultando a permanência do grão em suspensão. Consequentemente, para o Ponto Atami, onde o tamanho de grão do fundo utilizado foi de 0,18 mm e o menor tamanho encontrado em suspensão foi de 0,11 mm, as taxas foram subestimadas em até 54%.

Da mesma forma, para diâmetros menores, a velocidade de decantação da partícula diminui, favorecendo sua permanência na coluna d'água por mais tempo e aumentando as concentrações médias. Isso foi observado nos pontos Caravelas e Praia Brava, ou seja, o diâmetro médio do fundo (D_{50F}) era menor do que os valores encontrados em suspensão (D_{50S}). Na Praia de Caravelas as taxas de transporte

foram superestimadas em até 20% considerando o maior diâmetro em suspensão de 0,19 mm e o do fundo representado pelo valor 0,17 mm.

Na Praia Brava o valor de D_{50S} máximo neste estudo de caso foi de 0,19 e o diâmetro do tamanho de grão do fundo D_{50F} utilizado para as estimativas de 0,13, resultando numa taxa superestimada em até 44% para as maiores alturas de onda.

Apesar dos sedimentos com menor granulometria se concentrarem na coluna d'água e serem transportados rapidamente, pode ocorrer acumulação no espraçamento e acresção no perfil praial sem que haja necessariamente transporte para pontos mais distantes (Komar, 1970). Portanto, existem muitas implicações na utilização de tamanhos de partículas distintos nas modelagens, principalmente as que consideram obras de engenharia na zona costeira, pois requerem estimativas mais acuradas das taxas totais anuais de transporte.

7 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo contribuem para melhor compreender a dinâmica dos sedimentos e podem servir para aprimorar os modelos matemáticos que buscam quantificar o transporte de sedimentos na zona de surfe.

- Com relação aos perfis de concentração de sedimentos calculados a partir dos dados coletados, a Praia Brava apresentou as menores concentrações de material transportado (até 0,326 g/L). O ponto Caravelas foi o que apresentou as maiores concentrações (até 1,042 g/L), seguido do ponto Atami, que apresentou valores de até 0,796 g/L. Os resultados sugerem que os processos erosivos na Praia Brava decorrem principalmente devido aos efeitos de construções inadequadas muito próximas à linha de costa, e não de taxas elevadas de transporte longitudinal.
- Modelos matemáticos ainda se mostraram ineficientes para representar as concentrações de sedimentos quando comparados com os dados de campo coletados através das armadilhas. Grande parte dos erros deriva da dificuldade em se obter a rugosidade do fundo relativa às formas de leito presentes, seja por medições ou através de aproximações.
- Foram observados quatro grupos de perfis verticais de concentração, que apresentam variação na sua forma em função da dominância ora dos processos relacionados à quebra da onda, ora das correntes longitudinais geradas pelas ondas, ora da interação mais uniforme dos dois processos. A concentração de sedimentos em suspensão apresentou-se variável no tempo e no espaço.

- Diferenças significativas no tamanho médio de grão foram encontradas para as amostras das praias estudadas. Metade dos resultados aponta para uma diminuição do tamanho de grão com a diminuição da profundidade.
- O modelo de Bayram *et al.* (2007) se mostrou sensível às variações nos tamanhos de grão escolhidos para representar as amostras do sedimento em suspensão, principalmente com maiores alturas de onda. Valores maiores de D_{50F} indicaram taxas subestimadas do transporte em até 54% para a praia do Atami quando comparadas aos valores encontrados nas amostras em suspensão. Em contrapartida, valores menores de D_{50F} resultaram em taxas superestimadas em até 20% para o balneário Caravelas e até 44% para a Praia Brava. Via de regra, menores diâmetros de partículas indicam maiores concentrações e volumes transportados.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBOTT, J. E. & FRANCIS, J.R.D., 1977. Saltation and suspension trajectories of solid grains in a water stream. *Proceedings of Royal Society*, 284(A):1321.

ACKERS, P. & WHITE, W. R., 1973. Sediment transport: new approach and analysis. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 99(1):2041-2060.

ALFREDINI, P., 1999. The longshore transport evaluation used as a tool for the brazilian coastline littoral processes knowledge. *Anais do VII Congresso Brasileiro da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário (ABEQUA)*, 13p.

ANGULO, R. J., 1984. As praias do Paraná: problemas decorrentes de uma ocupação inadequada. *Análise Conjuntural*, v. 1, n. 6, p. 1-4.

ANGULO, R. J., 1992. Geologia da Planície Costeira do Estado do Paraná. Tese de doutorado, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, Brasil, p. 334.

ANGULO, R. J., 1993a. Variações na configuração da linha de costa no Paraná nas últimas quatro décadas. *Boletim Paranaense de Geociências*. Curitiba. 41:52-72.

ANGULO, R. J., 1993b. A ocupação urbana do litoral paranaense e as variações da linha de costa. *Boletim Paranaense de Geociências*. Curitiba. 41:73-81.

ANGULO, R. J., 1995. Feições deposicionais associadas às desembocaduras dos complexos estuarinos da costa paranaense. V Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, ABEQUA. Niterói-RJ. Anais. p. 58-64.

ANGULO, R. J & ARAÚJO, A. D., 1996. Classificação da costa paranaense com base na sua dinâmica como subsídio à ocupação da orla litorânea. *Boletim Paranaense de Geociências*, n. 44, p. 7-17.

ANGULO, R. J., 1999. Morphological characterization of the tidal deltas on the coast of the State of Paraná. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 71 (4-II), 935–959

ANGULO, R. J., SOARES, C. R., MARONE, E., SOUZA, M. C., ODRESKI, L. L. R. & NOERNBERG, M. A., 2004. Atlas de erosão costeira do estado do Paraná. Relatório técnico In: Atlas de erosão e progradação do litoral do Brasil.

BAGNOLD, R. A., 1956. The flow of Cohesionless grains in fluids. Proc. Royal Soc. Philos. Trans., London, vol. 249.

BAILARD, J. A., INMAN, D. L., 1981. An energetics bedload model for plane sloping beach: local transport. Journal of Geophysical Research, 86 (C3), 2035– 2043.

BAYRAM, A., LARSON, M., MILLER, H. C., KRAUS, N. C., 2001. Cross-shore distribution of longshore sediment transport: comparison between predictive formulas and field measurements. Coastal Engineering 44: 79-99.

BAYRAM, A., LARSON, M. & HANSON, H., 2007. A new formula for the total longshore sediment transport rate, Coastal Engineering, 54, 700–710.

BESSA, J. R. O., 2003. Interferência entre a ocupação urbana e a dinâmica natural no litoral sul do Paraná. Curitiba, 2003. 153p. Análise Conjuntural, v.25, n.11-12, p.13, nov./dez.

BIGARELLA, J. J., BECKER, R. D., MATOS, D. J., WERNER, A., 1978. A Serra do Mar e a porção oriental do Estado do Paraná. Um problema de segurança ambiental e nacional. Curitiba, Gov. Par./SEPL/ADEA. 249p.

BIJKER, E. W., 1967. Some considerations about scales for coastal models with movable bed. Delft Hydraulics Laboratory, Publication nº 50, Delft, The Netherlands.

BIJKER E. W., 1971. Longshore transport computations. Journal of Waterways, Harbours and Coastal Engineering Division, American Society of Civil Engineers 97 WW4 pp. 687–701.

BITTENCOURT, A. C. S. P., DOMINGUEZ, J. M. L., MARTIN, L., SILVA, I. R., 2003. Uma aproximação de primeira ordem entre o clima de ondas e a localização, de longa duração, de regiões de acumulação flúvio-marinha e de erosão na costa norte do Brasil. Revista Brasileira de Geociências, 33(2), 159-166.

BORZONE, C. A., GUTSEIT, K. C., SOARES, C. R., 1999. Sedimentos e macrofauna bentônica da zona de águas rasas da praia de Matinhos, Paraná, Brasil. Revista Atlântica, Rio Grande, v. 21, p. 43-58, 1999.

CALDWELL, J. M., 1956. Wave action and sand movement near Anaheim Bay, Califórnia. Technical Memorandum nº 68, Beach Erosion Board, U.S. Army Corps of Engineers. 21p.

CALLIARI, L. J. & A. H. KLEIN., 1993. Características morfodinâmicas e sedimentológicas das praias oceânicas entre Rio Grande e Chuí, RS. Pesquisas, 20(1): 48-56.

CASTANHO, J., 1966. Rebentação das ondas e transporte litoral. Memória 275, Laboratório Nacional de Engenharia. 278p.

CIAVOLA, P., TABORDA, R., FERREIRA, O. & DIAS, J. A., 1997. Field measurements of longshore sand transport and control processes on a step meso-tidal beach in Portugal. Journal Coastal Research, 13(4):1119-1129.

DAVIES, A. G. & VILLARET, C., 2002 Prediction of sand transport rates by waves and currents in the coastal zone Continental Shelf Research 22 (2002) 2725–2737

DAVIES, R. A. & HAYES, M. O. 1984. What is a wave-dominated coast? Marine Geology, 60: 313-329.

DOUGLASS, S. L., 1985. Longshore sand transport statistics. Thesis presented to Mississippi State University, Mississippi State, Miss., in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science.

EINSTEIN, H. A., 1950. The bed-load function for sediment transportation in open channel flow. Technical Bulletin, nº 1026, U.S. Dept. of Agriculture, Washington, USA.

ELFRINK, B. & BALDOCK, T., 2002. Hydrodynamics and sediment transport in the swash zone: a review and perspectives. Coastal Engineering, 45:142-167.

ENGELUND, F. & HANSEN, E., 1967. A monograph on sediment transport in alluvial streams. Teknisk Vorlag, Copenhagen. 230

ESTEVEZ, L. S. 2004. Variabilidade espaço-temporal dos deslocamentos da linha de costa no Rio Grande do Sul. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, UFRGS, Porto Alegre, RS. 139 pp.

FOLK, R. L., WARD, W. C., 1957. Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters. Journal of sedimentary Petrology, 27(1):3-26.

FONTOURA, J. A. S., 2004. Hidrodinâmica costeira e quantificação do transporte longitudinal de sedimentos não coesivos na zona de surfe das praias adjacentes aos molhes da barra do Rio Grande, RS, Brasil. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS, Porto Alegre. Tese de Doutorado. 282 pp.

FREDSOE, J. & DEIGAARD R., 1992. Mechanics of Coastal Sediment Transport World Scientific Publishing Co Pte Ltd.

GALVIN, C. J., 1963. Longshore currents on a laboratory beach. Ph.D Thesis, Massachusetts Institute of Technology at Cambridge, Massachusetts.

GALVIN, C. J., 1968. Breaker Type Classification on Three Laboratory Beaches, *Journal of Geophysical Research*, Vol 73, No. 12, pp 3651-3659.

GARCEZ FARIA, A. F., THORNTON, E. B., STANTON, T. P., SOARES, C.V., LIPPMANN, T. C., 1998. Vertical profiles of longshore currents and related bed shear stress and bottom roughness. *Journal of Geophysical Research* 103 (C2), 3217–3232.

HARARI, J. & CAMARGO, R. de, 1994. Simulação da propagação das nove principais componentes de maré na plataforma sudeste brasileira através de modelo numérico hidrodinâmico. *Bol. Inst. Ocean. – USP*. 42(1): p.35-54.

HUBERTZ, J. M., 1986. Observations of local wind effects on longshore currents. *Coastal Engineering*, 10:275-288. 231.

INMAN, D. L. & BAGNOLD, R. A., 1963. Beach and nearshore processes part II: littoral processes. *Contribution to: The Sea*. General Editor: M. N. Hill, John Wiley and Sons, 3:529-553

INMAN, D. L., 1978. Status of surf zone sediment transport relationships. *Proceedings of Workshop on Coastal Sediment transport with Emphasis on the National Sediment Transport Study*, University of Delaware, Sea Grant Report DEL-SG-16-78, 9-20.

INMAN, D. L., ZAMPOL, J. A., WHITE, T. E., HANES, D. M., WALDORF, B. W. & KASTENS, K. A., 1981. Field measurements of sand motion in the surf zone. *Proceedings of the 17th Coastal Engineering Conference*, American Society of Civil Engineers, 1215-1234.

IPARDES – Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e social. 1990. Macrozoneamento da APA de Guaraqueçaba. Curitiba, IPARDES, 2 v., 257p.

IPARDES - Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e social. 1991. Diagnóstico físico-ambiental da Serra do Mar - área sul. Curitiba, IPARDES, 2 v., 107 p.

KAMPHUIS, J. W., DAVIES, M. H., NAIRN, R.B. & SAYAO, O. J., 1986. Calculation of littoral sand transport rate. *Coastal Engineering*, 10:1-21.

KAMPHUIS, J. W., 1991. Alongshore sediment transport rate. *Journal of the Waterways. Port, Coastal and Ocean Engineering*. ASCE 117 (6).

KANA, T. W., 1976. A new apparatus for collecting simultaneous water samples in the surf zone. *Journal of Sedimentary Petrology*, 46(4):1031-1034.

KANA, T. W., 1979. Surf zone measurements of suspended sediment. *Proceedings of the 16th Coastal Engineering Conference, American Society of Civil Engineering*, 1725-743.

KOMAR, P. D., 1969. The longshore transport of sand beaches. Ph D Thesis, University of California, San Diego, 141p.

KOMAR, P. D. & INMAN, D. L., 1970. Longshore sand transport on beaches. *Journal of Geophysical Research*, 75(30):5514-5527.

KRAUS, N. C., ISOBE, M., IGARASHI, H., SASAKI, T.O. & HORIKAWA, K., 1983. Field experiments on longshore sand transport in the surf zone. *Proceedings of the 18th Coastal Engineering Conference, American Society of Civil Engineers*, 969-988.

KRAUS, N. C., 1987. Application of portable traps for obtaining point measurements of sediment transport rates in the surf zone. *Journal of Coastal Research*, 3(2):139-152.

KRAUS, N. C., DEAN, J. L., 1987. Longshore sand transport rate distribution measured by sediment trap. *Coastal Sediments '87, American Society of Civil Engineers (New York)*, 891-896.

KUMAR, V. S., CHANDRAMOHAN, P., KUMAR, K. A., GOWTHAMAN, R. & PEDNEKAR, P., 2000. Longshore currents and sediment transport along Kannirajapuram, Tamilnadu, India. *Journal Coastal Research*, 16(2):247-254.

LANFREDI, N. W. & FRAMINÁN, M. B., 1986. Field study and prediction of longshore currents, argentine coast. *Journal Coastal Research*, 2(4):409-417.

LIMA, S. F., ALMEIDA, L. E. S. B. & TOLDO, E. E. JR., 2001. Estimativa da capacidade do transporte longitudinal de sedimentos a partir de dados de ondas para a costa do Rio Grande do Sul. *Pesquisas*, 28(2), 99–107.

LONGUET-HIGGINS, M. S., 1970. Longshore Currents generated by obliquely incident sea waves. Parts 1 and 2. *Journal of Geophysical Research* 75 (33), 6778–6789, e pp. 6790–6801.

LONGUET-HIGGINS, M. S., 1972. Recent progress in the study of longshore currents. Contribution to: 'Waves on beaches and resulting sediment transport', edited by R. E. Meyer, Academic Press, New York.

MARONE, E. & CAMARGO, R. de, 1994. Marés meteorológicas no litoral do Estado do Paraná: o evento de 18 de agosto de 1993. *Nerítica*. 8(1-2). p.73-85.

MARONE, E., PRATA JR. V. P., KLINGENFUSS, M. S. & DE CAMARGO, R., 1995. Correntes de deriva no Litoral Paranaense: Um caso de estudo. VI Congresso Latinoamericano de Ciencias del Mar. Mar del Plata, Argentina.

MARONE, E., MANTOVANELLI, A., NOERNBERG, M. A., KLINGENFUSS, M. S., LAUTERT, L.F.C., PRATA JUNIOR, V.P., 1997. Caracterização Física do Complexo Estuarino da Baía de Paranaguá. Pontal do Sul: UFPR. v.2. Relatório APPA/CEM.

MARTINS, G. J., MARONE, E., ANGULO, R. J., NOERNBERG, M. A. & QUADROS, C. J. L., 2004. Dinâmica da zona de rasa de shoaling e o transporte de sedimentos na desembocadura sul do complexo estuarino de Paranaguá. *Boletim Paranaense de Geociências*, n. 54, p. 51-64, Editora UFPR

MASSELINK, G. & PULEO, J. A., 2006. Swash-zone morphodynamics. *Continental Shelf Research*, 26. 661–680.

MILLER, R. L., 1976. Role of vortices in surf zone prediction: sedimentation and wave forces. Symposium Beach and nearshore sedimentation, Dallas, USA.

MILLER, H. C., 1999. Field measurements of longshore sediment transport during storms. *Coastal Engineering*, 36, 301–321.

NETPAR - Um modelo em proteção e recuperação de praias atacadas pela erosão marinha. 1997 [Acessado em 16/11/2007] <http://www.netpar.com.br/lindroth/>

NIELSEN, P., 1992. Coastal Bottom Boundary Layer and Sediment Transport. World Scientific Publishing Co., River Edge, NJ, USA.

NIMER, E., 1977. Clima. In: IBGE - Geografia do Brasil, Região Sul. SERGRAF-IBGE, Rio de Janeiro, p. 35-79.

NOERNBERG M. A., 2001. Processos Morfodinâmicos no Complexo Estuarino de Paranaguá – Paraná – Brasil: Um Estudo a Partir de Dados in situ e Landsat – TM. Curitiba. Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Tese de Doutorado, 180 p.

OLIVEIRA, A. S., 1986. Interações entre sistemas frontais na América do Sul e convecção na Amazônia. Dissertação de Mestrado, INPE, São José dos Campos, 246p.

PETERS, K. & DETTE, H. H., 1999. Sediment suspension in the surf Zone. 'Coastal Sediments 99', International Coastal Symposium, 195-208.

PORTOBRAS, 1983. Campanha de medições de ondas em Paranaguá - PR (período 21/08/1982 a 21/01/1983). Divisão de Apoio Técnico e Científico (DIATEC), Instituto de Pesquisas Hidroviárias (INPH), Relatório INPH 34/83, Rio de Janeiro, p. 23

QUADROS, C. J. L., 2002. Variações morfológicas e volumétricas associadas à incidência de sistemas frontais em duas praias arenosas do litoral paranaense. Dissertação de mestrado, Pós-Graduação em Geologia Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 57 pp

SAMPAIO, R., 2006. Uso balneário, apropriação do espaço e meio ambiente em Pontal do Paraná, litoral paranaense. Curitiba, Brazil. Tese de doutorado - Universidade Federal do Paraná.

SAVAGE, R. P., 1962. Laboratory determination of littoral transport rates. *Journal of Waterways and Harbours Division*, ASCE, WW2:69-92.

SCHOONEES, J. S., & THERON, A. K., 1994. Accuracy and applicability of the SPM longshore transport formula. Proceedings of the 24th ICCE, ASCE, Kobe, Japan.

SCHOONEES, J. S., 1996. Improvement of the most accurate longshore transport formula. Proceedings of the 25th ICCE, ASCE, Orlando, USA.

SOARES, C. R., BORZONE, C. A., SOUZA, J. R. B., 1996. Variação morfológica e sedimentológicas ao longo de um ciclo anual numa praia arenosa no sul do Brasil. *Ecologia Brasiliensis*, Rio de Janeiro, III:245-258.

SOULSBY, R. L., HAMM, L., KLOPMAN, G., MYRHAUG, D., SIMONS, R. R. & THOMAS, G. P., 1993. Wave-current interactions within and outside the bottom boundary layer. *Coastal Engineering*, 21, 41-69.

SOULSBY, R. L., 1997. *Dynamics of Marine Sands: a Manual for Practical Applications*. London, Thomas Telford Publications, 249p.

SOUZA, M. A., ANGULO, R. J., ASSINE, M., DISARÓ, S. T., PESSENDA, L. C. R., ARAÚJO, A. D., ODRESKY, L. L. R., VEIGA, F. A., SOUSA, S. H. M. 2003. Evolução da barreira holocênica no litoral do Estado do Paraná, sul do Brasil. 2003. IX Congr. da Ass. Bras. de Estudos do Quaternário, ABEQUA. Recife-PE. Boletim de resumos, p. 85.

SWART, D. H., 1974. Offshore sediment transport and equilibrium beach profiles. Delft Hydraulic Lab Publication No. 131.

TESSLER, M 1988. *Dinâmica sedimentar quaternária no litoral sul paulista*. São Paulo. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade de São Paulo.

THORNTON, E. B. & MORRIS, W. D., 1978. Suspended sediments measured within the surf zone. Proceedings of the 17th Coastal Sediments '77, American Society of Civil Engineers, 655-668.

TURNER, R. K., & VON BODUNGEN, B., 2001. *Science and integrated coastal management*. Dahlem University Press.

USACE, 1984. *Shore Protection Manual*. Department of the Army, U.S. Corps of Engineers, Washington, DC20314.

VAN RIJN L. C., 1984. Sediment transport Part I: bed load transport; part II: suspended load transport; and part III: bed forms and alluvial roughness. *Journal of the Hydraulic Division, ASCE*, 110, HY10, 1431-1456; HY11, 1613-1641; HY12, 1733-1754.

VAN RIJN, L. C., 1993. *Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas*. Aqua Publications, Amsterdam.

VAN RIJN, L. C., DAVIES, A. G., VAN DE GRAAFF, J., RIBBERINK, J. S., 2001. *SEDMOC: Sediment Transport Modelling in Marine Coastal Environments*. Aqua Publications, Amsterdam.

VAN RIJN L. C., WALSTRA, D. J. R., GRASMEIJER, B., SUTHERLAND, J., PAN S. & SIERRA J. P., 2003. The predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storms and seasons using process-based Profile models. *Coastal Engineering*, 47(3), 295–327

WANG, P., KRAUS, N. C., DAVIS, R. A., 1998a. Total longshore sediment transport rate in the surf zone: Field measurements and empirical predictions. *Journal of Coastal Research*, 269-282.

WANG, P., DAVIS, R. A., KRAUS, N. C. 1998b. Cross-shore distribution of sediment texture under breaking waves along low-wave energy coasts. *Journal of Sedimentary Research*, 68(3): 497-506.

WANG, P., EBERSOLE, B. A., SMITH, E. R., 2002. Longshore sand transport – initial results from large-scale sediment transport facility. U.S. Army Corps of Engineers, ERDC/CHL CHETN-II-46, 10 p.

WATANABE, A. 1992. Total rate and distribution of longshore sand transport. IN: *Proc. 23rd Coastal Eng. Conf., Venice*. American Society Civil Engineering, 2528-2541.

WATTS, G. M., 1953. A study of sand movement at South Lake Worth Inlet, Florida. Beach Erosion Board, Technical Memorandum n° 42, U.S. Army Corps of Engineers.

WEGGEL, J. R. & PERLIN, M., 1988. Statistical description of Longshore transport environment. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. 114(2):125-145.

WENTWORTH, C. K., 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*, 30:377-392.

WILLIAMS J. J., ROSE, C. P., THORNE, P. D., O'CONNOR, B. A., HUMPHERY, J. D., HARDCASTLE, P. J., MOORES, S. P., COOKE, J. A., WILSON, D. J., 1999a. Field observations and predictions of bed shear stresses and vertical suspended sediment concentration profiles in wave-current conditions. *Continental Shelf Research* 19 (4), 507–536.

WILLIAMS, J. J., ROSE, C. P., VAN RIJN, L. C., 1999b. Vertical suspended sediment concentration profiles in combined wave-current flows. *Journal of Hydraulic Engineering* 125 (9), 906–911.

WILLIAMS J. J., ESTEVES, L. S. 2004. Predicting shoreline response to changes in longshore sediment transport for the Rio Grande do Sul coastline. *Notas Técnicas da Facimar, Ciências Tecnológicas da Terra e do Mar, Universidade do Vale do Itajaí*, 9pp.

WILLIAMS J. J. & ESTEVES L. S., 2005. Predicting shoreline changes: A case study in Rio Grande do Sul, Brazil. *Geophysical Research Letters* Vol. 32: doi:10.1029/2005GL022979.

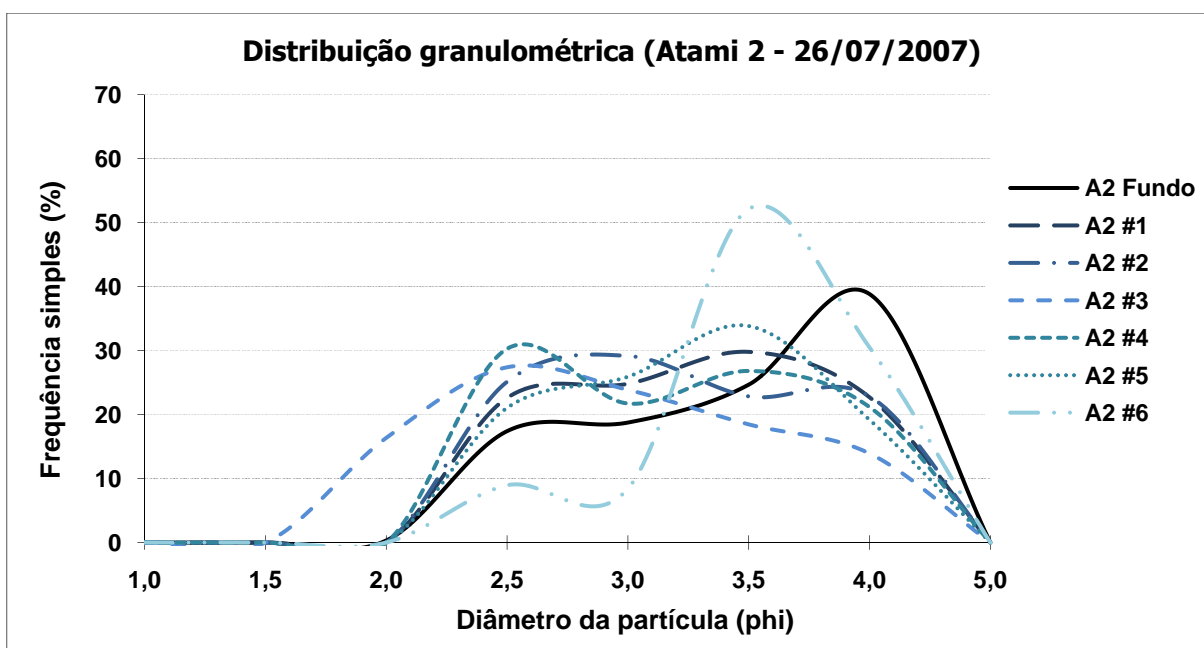
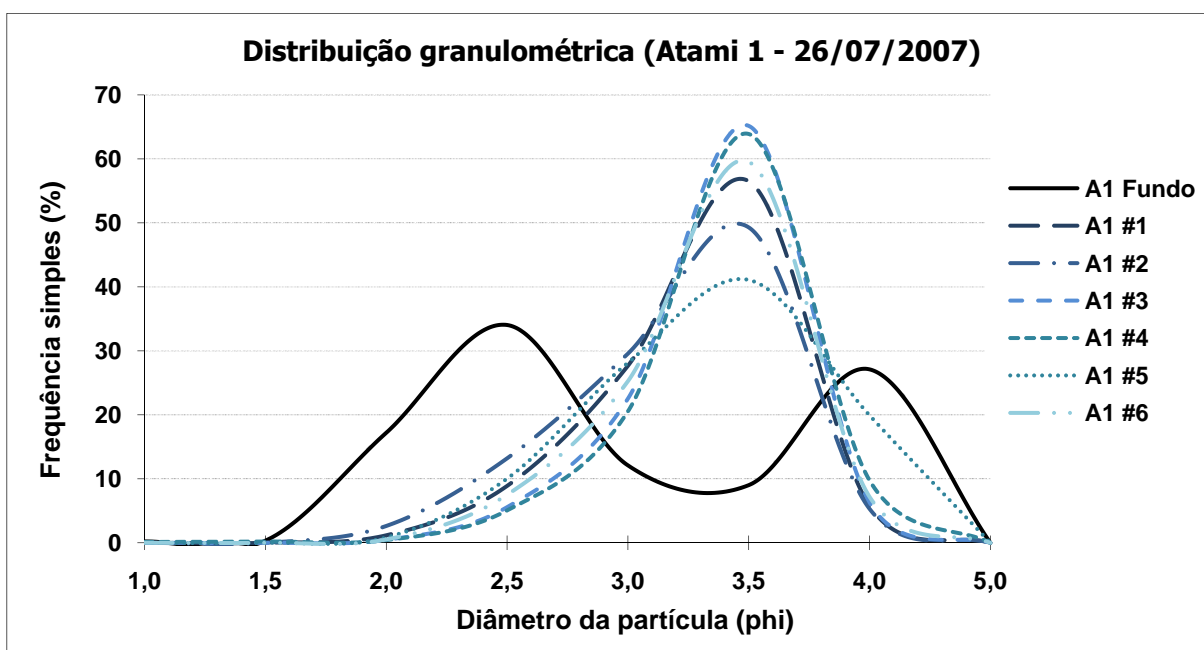
WILLIAMS J. J., ESTEVES L. S., LISNIEWSKI M. A. & PEROTTO H., 2007. Field measurements and modelling of longshore sediment transport. *Proceedings Coastal Sediments '07*, Vol. 1, ASCE, 221-234.

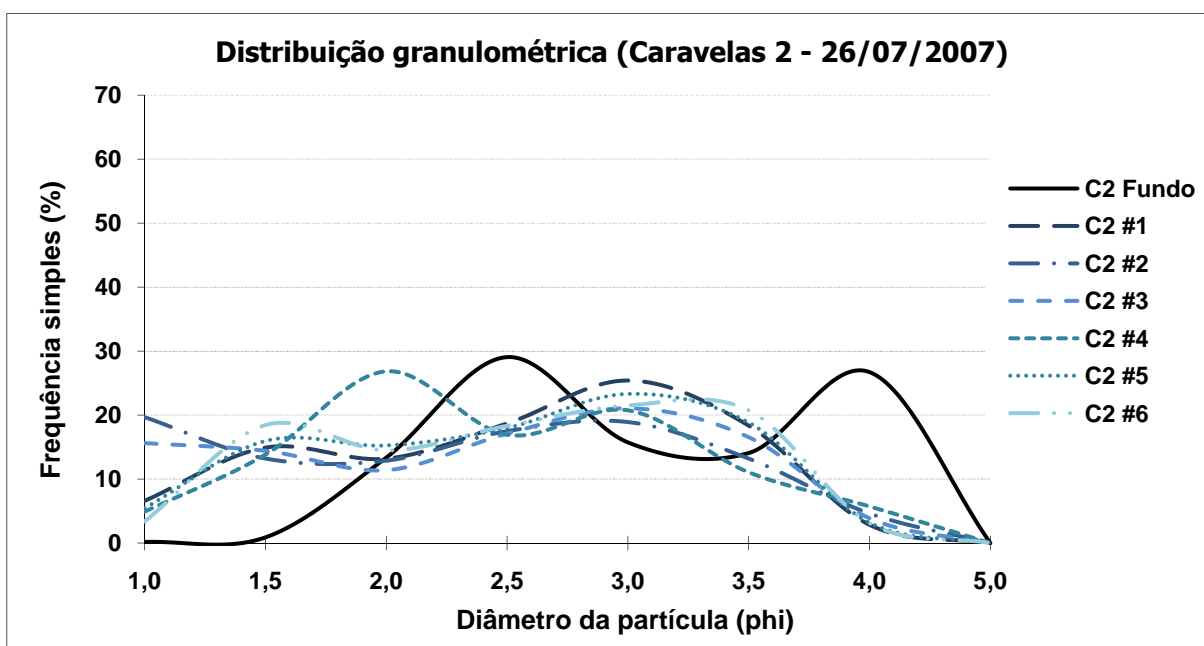
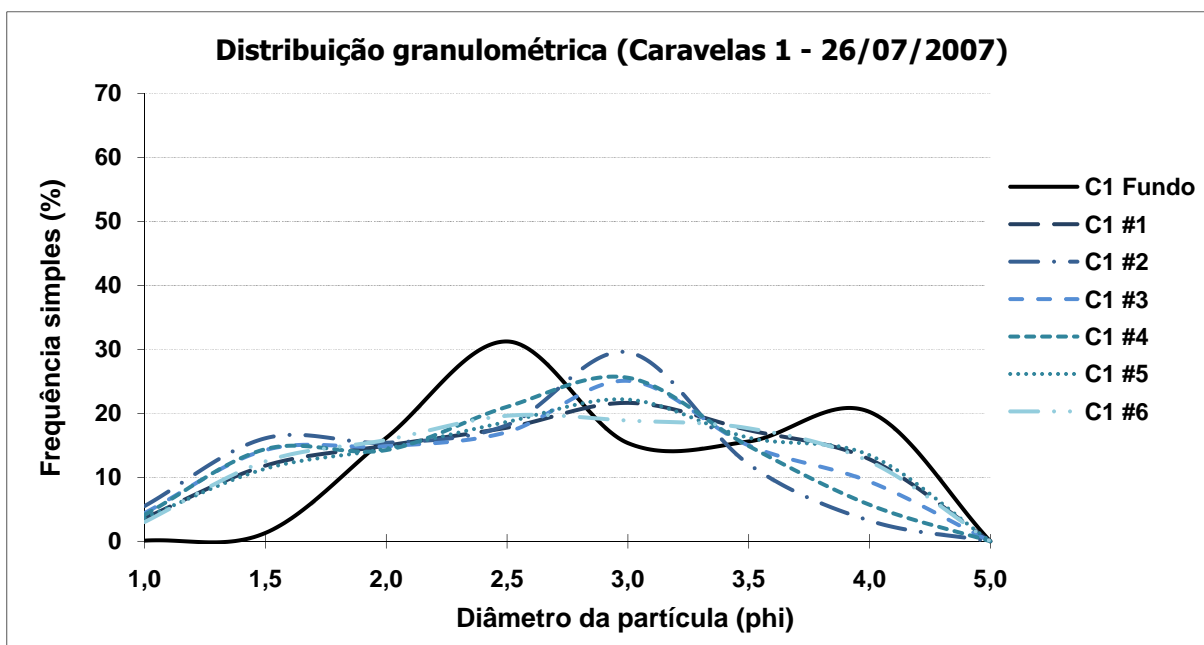
WRIGHT, L.D. & Short, A. D., 1984. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A Synthesis: *Marine Geology*, v. 56, p. 93-118

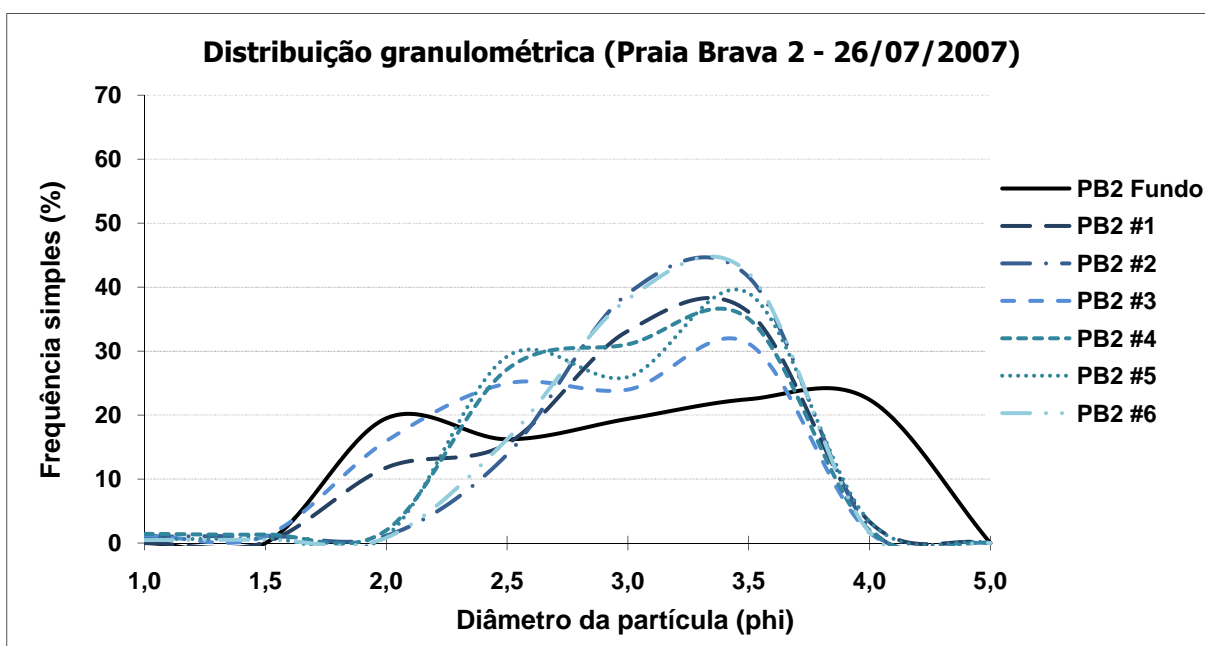
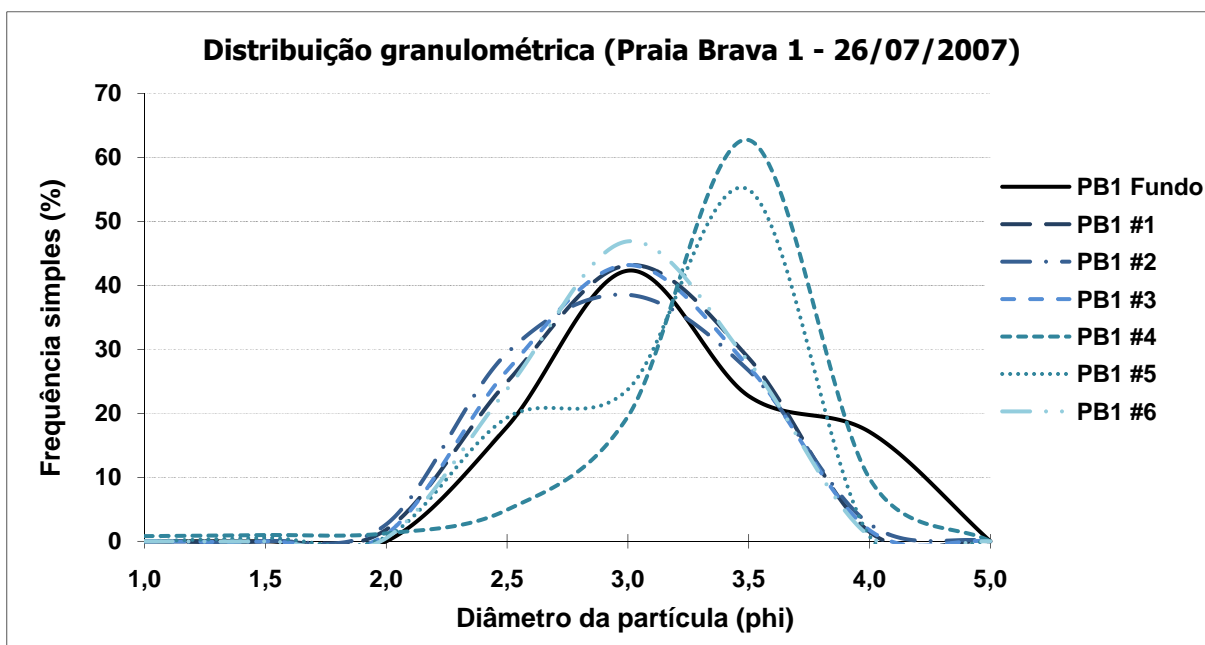
ZYSERMAN J. A. & FREDSOE J., 1994. Data analysis of bed concentration of sediment. *Journal of Hydraulic Engineering*, 120 (9), 1021-1042.

9 APÊNDICES

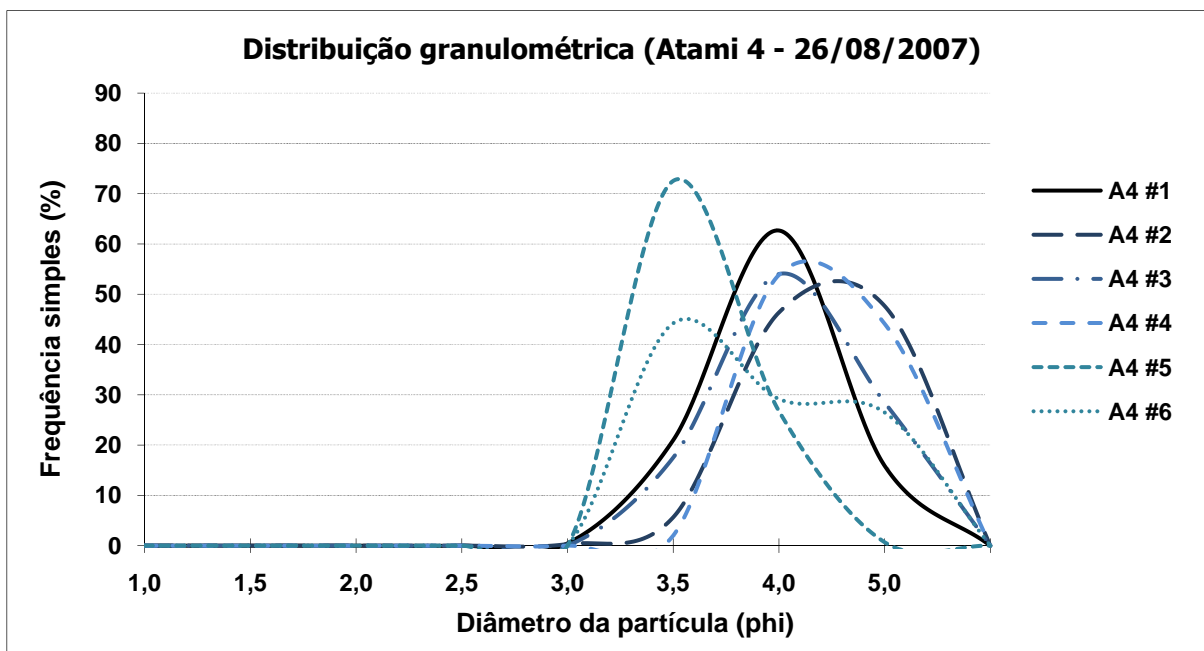
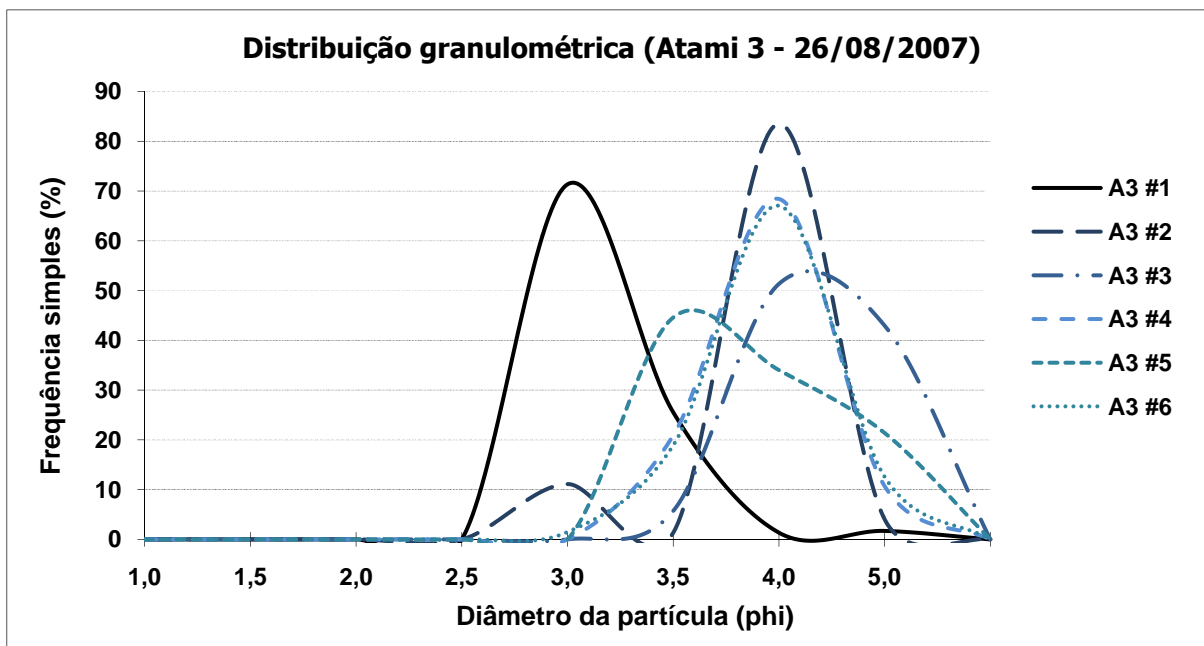
1 – Distribuição granulométrica das amostras coletadas no dia 26 de julho de 2007, nos pontos Atami, Caravelas e Praia Brava. A numeração de cada amostra é identificada por #1, #2, #3, #4, #5 e #6, iniciando da rede mais próxima ao fundo (#1) até a mais próxima à superfície (#6).

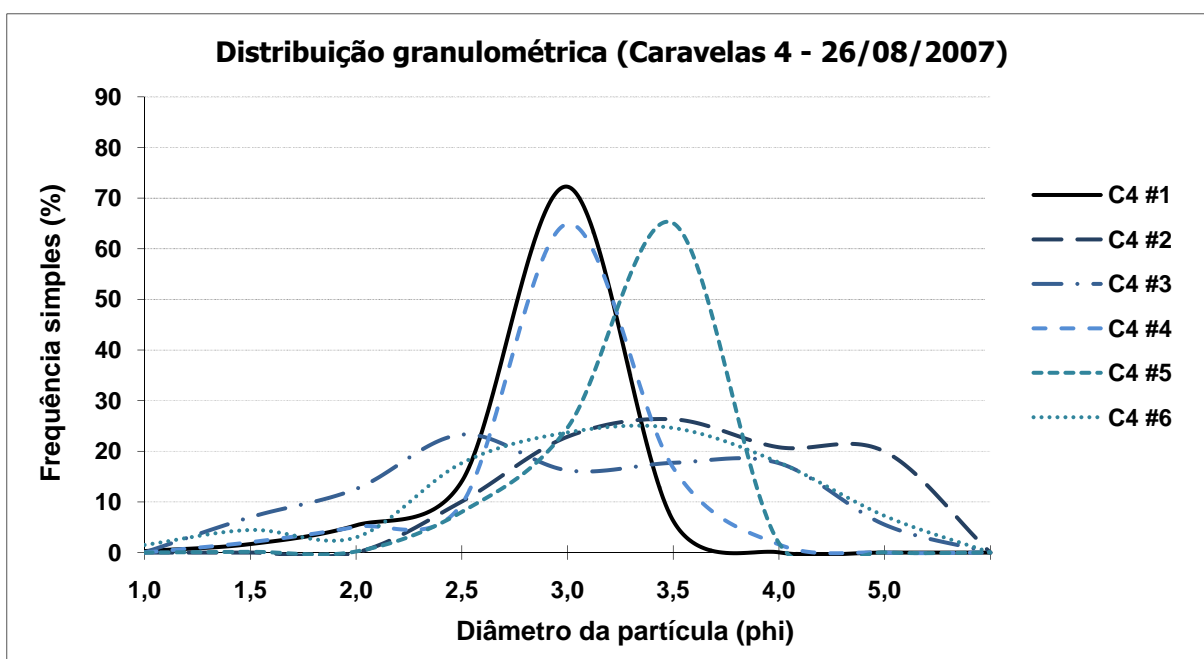
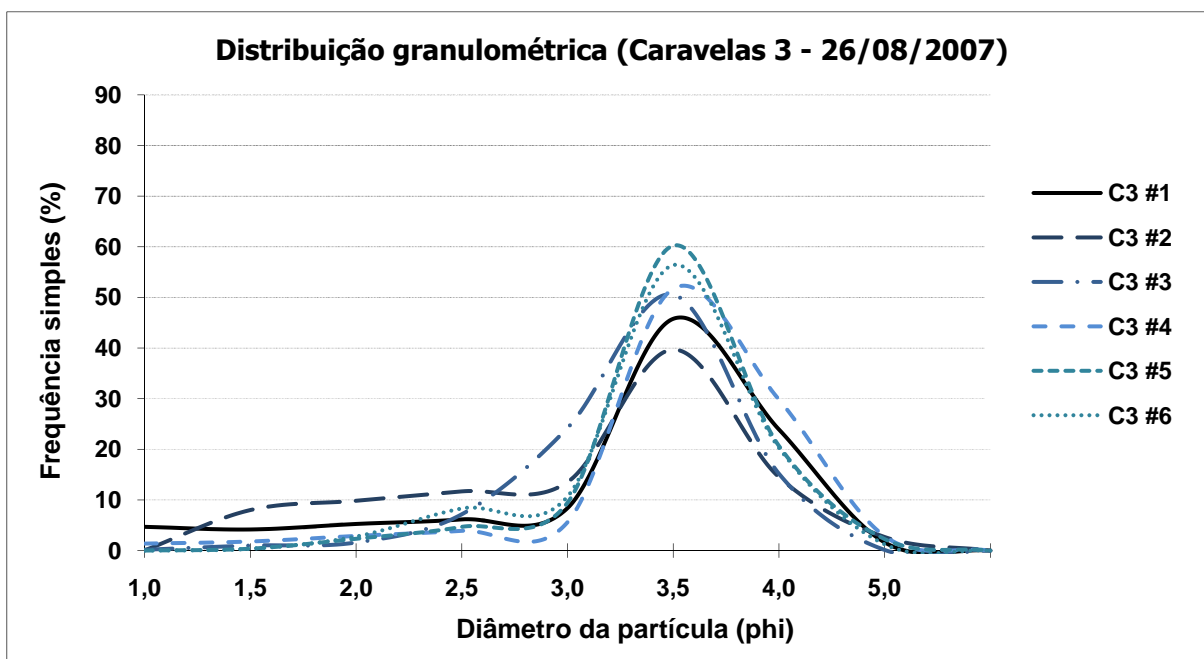


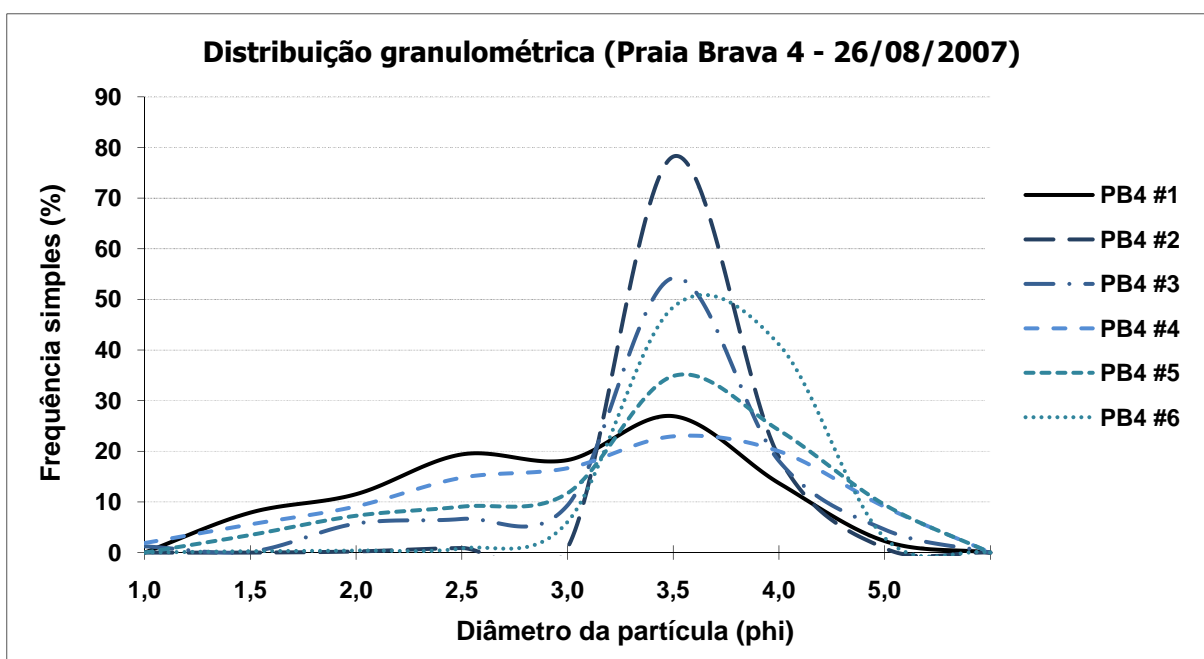
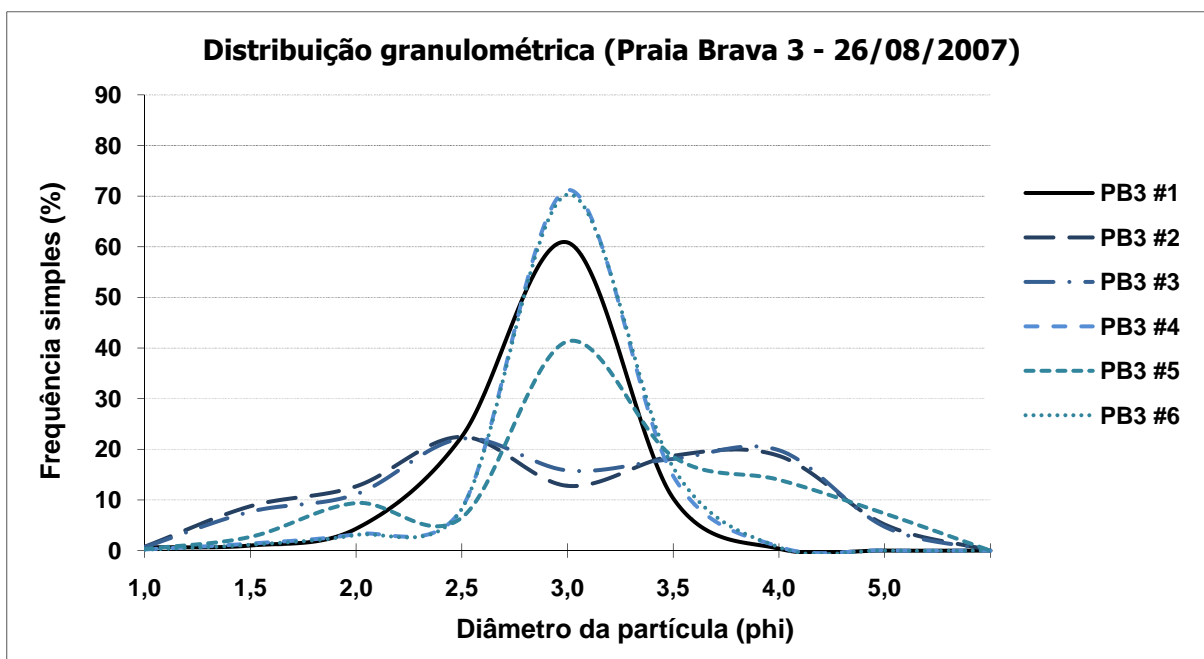




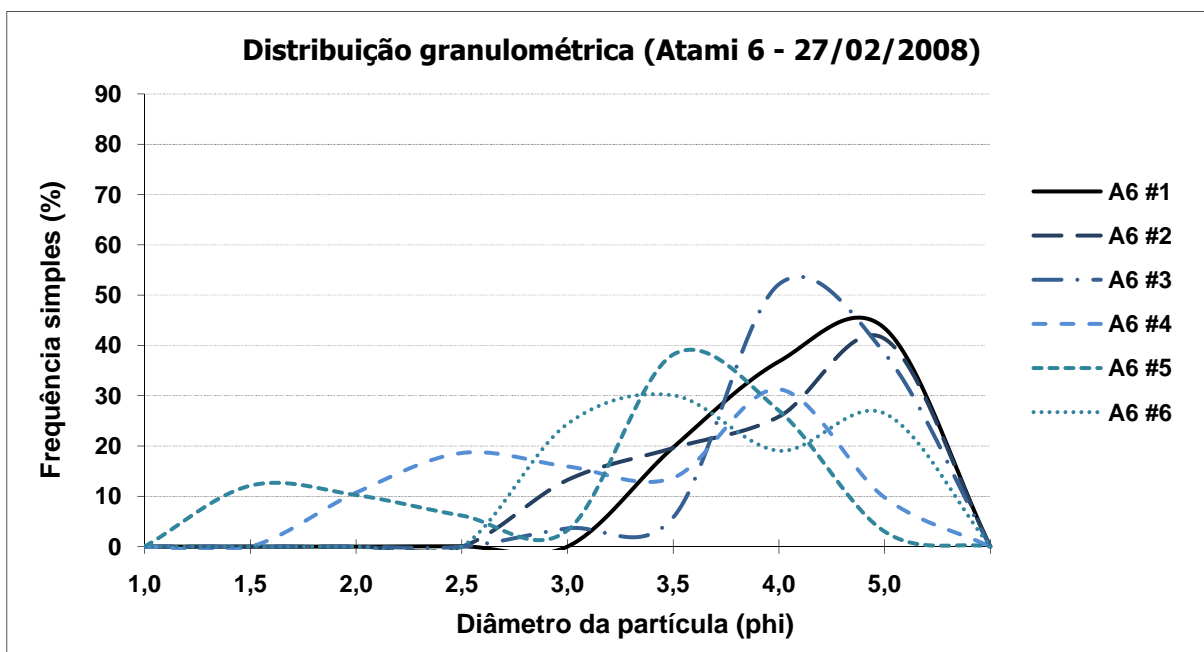
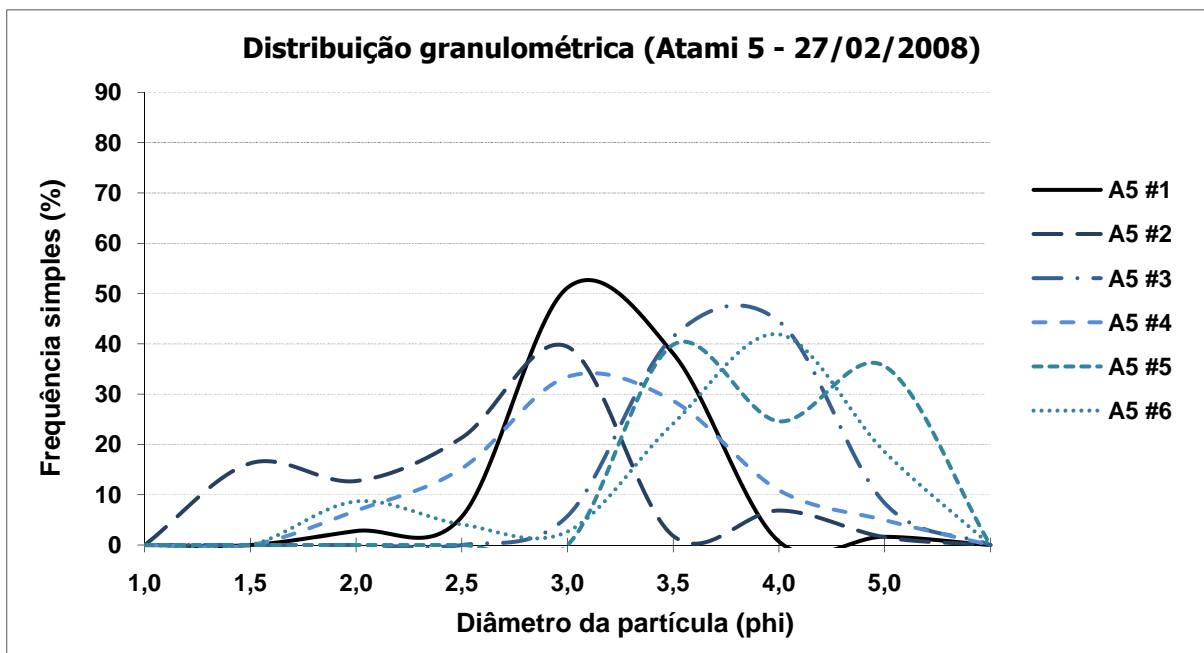
2 – Distribuição granulométrica das amostras coletadas no dia 26 de agosto de 2007, nos pontos Atami, Caravelas e Praia Brava. A numeração de cada amostra é identificada por #1, #2, #3, #4, #5 e #6, iniciando da rede mais próxima ao fundo (#1) até a mais próxima à superfície (#6).

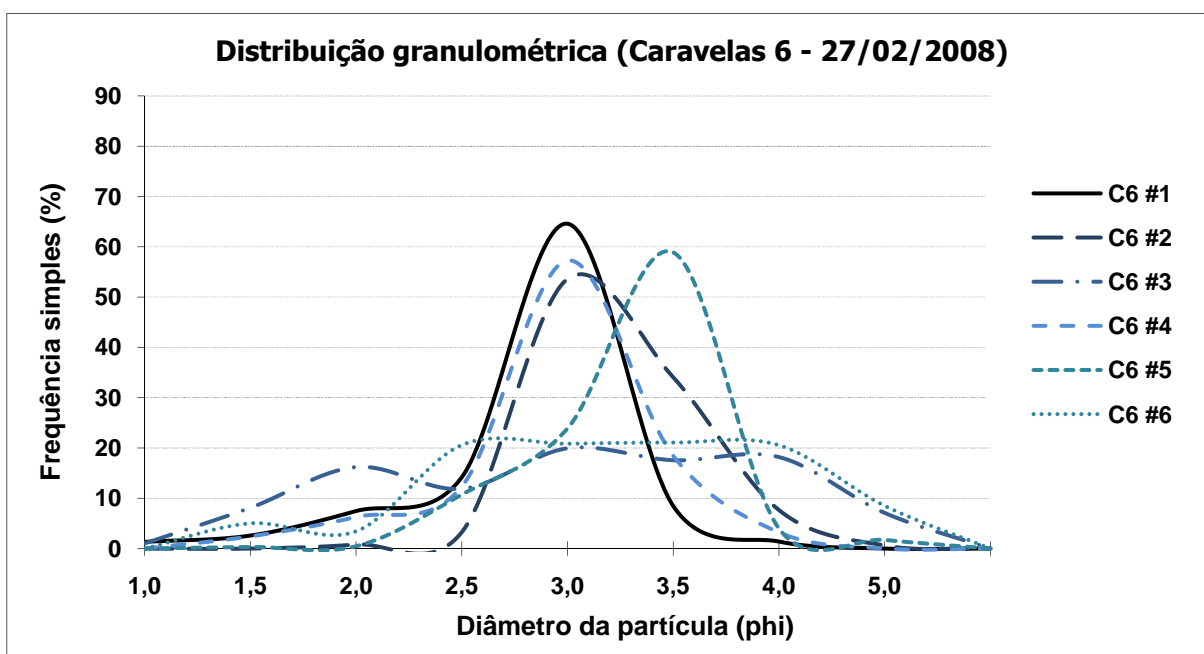
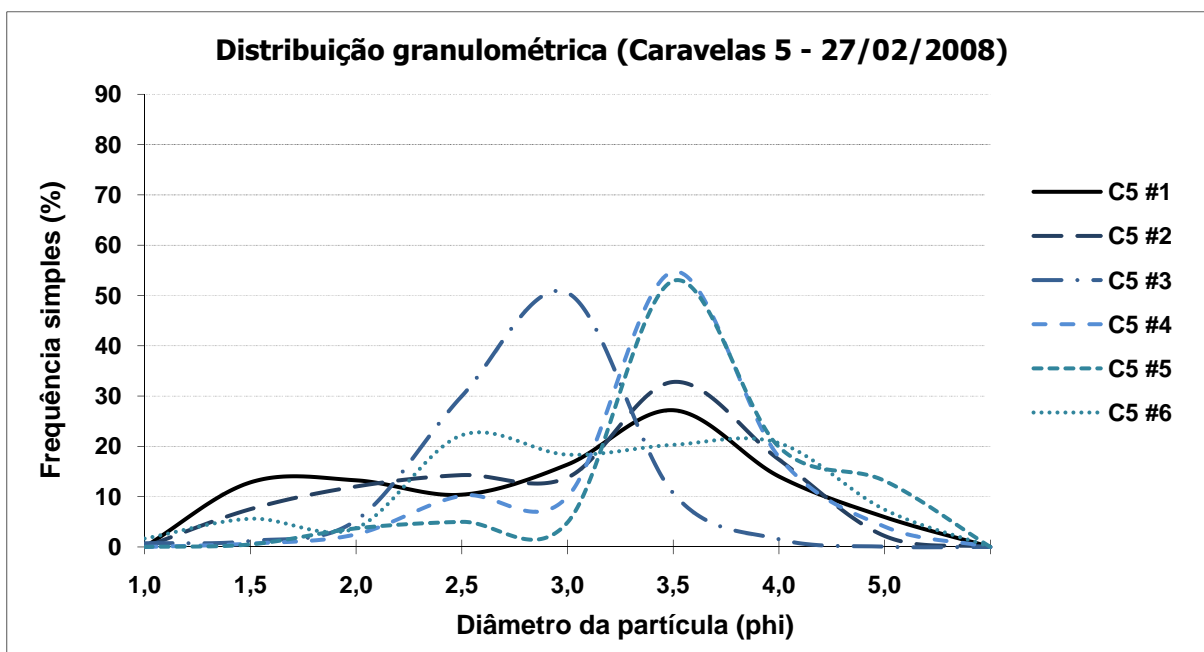


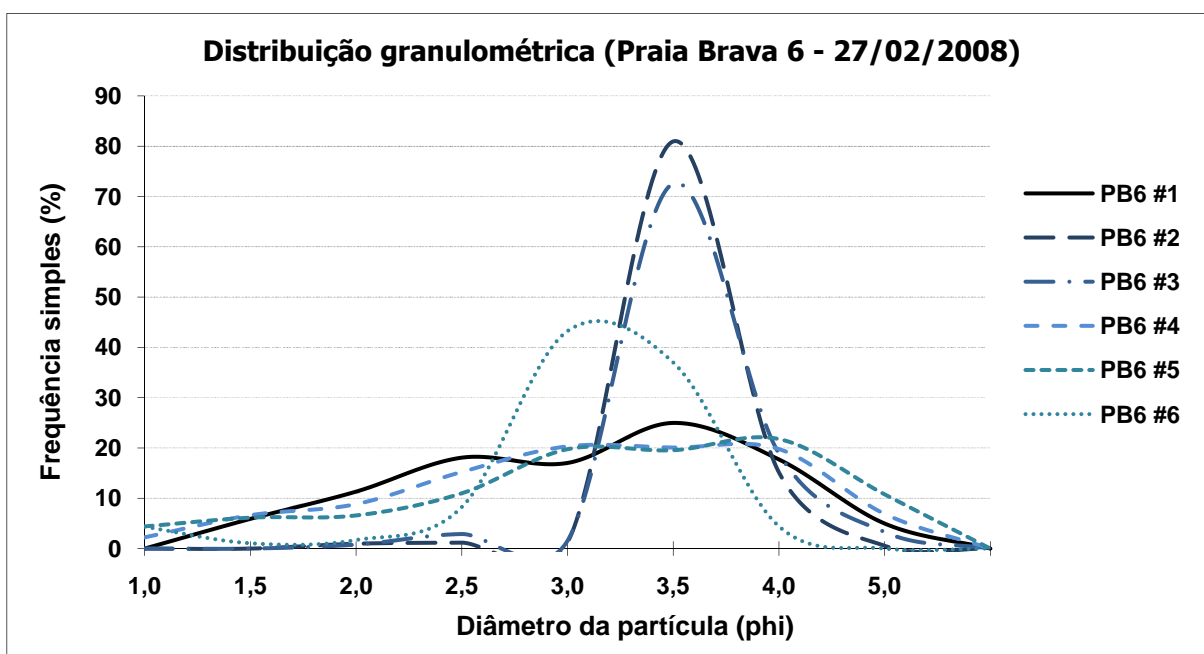
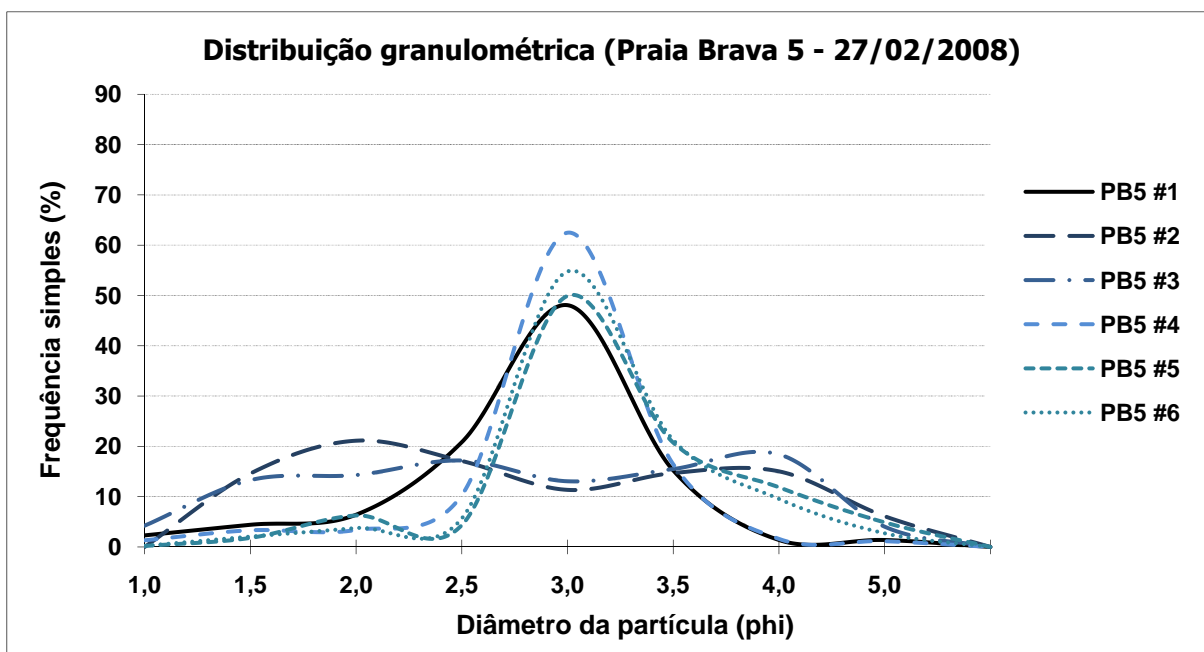




3 – Distribuição granulométrica das amostras coletadas no dia 27 de fevereiro de 2008, nos pontos Atami, Caravelas e Praia Brava. A numeração de cada amostra é identificada por #1, #2, #3, #4, #5 e #6, iniciando da rede mais próxima ao fundo (#1) até a mais próxima à superfície (#6).







4 – Distribuição granulométrica das amostras coletadas no dia 19 de março de 2008, nos pontos Atami, Caravelas e Praia Brava. A numeração de cada amostra é identificada por #1, #2, #3, #4, #5 e #6, iniciando da rede mais próxima ao fundo (#1) até a mais próxima à superfície (#6).

